UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis de accesibilidad geográfica del Sistema Estratégico de Transporte Público (SETP) en la ciudad de Armenia

ING. MATEO ROJAS DÍAZ

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Maestría en Ingeniería – Infraestructura y Sistemas de Transportes – Profundización
Manizales, Colombia

2019

Análisis de accesibilidad geográfica del Sistema Estratégico de Transporte Público (SETP) en la ciudad de Armenia

ING. MATEO ROJAS DÍAZ

Trabajo final para optar el título de:

Magister en Ingeniería – Infraestructura y Sistemas de Transporte

Director (a):

PhD. Diego Alexander Escobar García
Ingeniero civil, Magister en Ingeniería Civil, Doctor en Gestión del Territorio e Infraestructura de Transporte

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Maestría en Ingeniería – Infraestructura y Sistemas de Transportes – Profundización
Manizales, Colombia

2019

El logro a obtener con este trabajo está dedicado especialmente a la pequeña Isabella, mi hija. El motor de mi vida y la mayor motivación para culminar mis estudios de Maestría.

Agradecimientos

Principalmente, agradezco a Dios y a mis padres por su formación y motivación constante para lograr mis propósitos; a mi hermano menor Jacobo, por motivarme a ser el ejemplo para él, en el desarrollo de su vida.

Al director del trabajo final, PhD. Diego Alexander Escobar García, que desde el inicio me brindó la oportunidad de iniciar esta Maestría tan valiosa y fundamental en mi formación profesional.

A la Universidad del Quindío, por su gran formación como Ingeniero Civil y posterior oportunidad de iniciar mi experiencia profesional aportando a la Institución.

Al ingeniero Carlos Arturo Córdoba, por su interés constante y consejos acertados para continuar con mi formación especializada.

A Amable, Empresa Industrial y comercial del Estado (E.I.C.E), por la valiosa información suministrada sobre el Sistema Estratégico de Transporte Público para la Ciudad de Armenia.

RESUMEN

ANÁLISIS DE ACCESIBILIDAD GEOGRÁFICA DEL SISTEMA ESTRATÉGICO DE TRANSPORTE PÚBLICO (SETP) EN LA CIUDAD DE ARMENIA

En el presente trabajo se determina el impacto generado por el Sistema Estratégico de Transporte Público de pasajeros - SETP, en la población de la ciudad de Armenia, en términos de Accesibilidad Geográfica, según las rutas proyectadas sobre la red vial destinada para la circulación de las mismas. A su vez se realiza un análisis sociodemográfico, con el fin de determinar qué estratos se están beneficiando en términos de tiempos medios de viaje, con la implementación del SETP, y de esta manera presentar una herramienta para la toma de decisiones, con relación a los proyectos de infraestructura vial que se están ejecutando actualmente para mejorar la movilidad de los vehículos dispuestos para operar el Sistema, así como la posible reorganización de las rutas que se proyectaron. Por otro lado, se realizó un análisis de accesibilidad geográfica de la red vial básica de la ciudad de Armenia, incluyendo el medio de transporte privado, con el fin de realizar una comparación entre éste último y el SETP. Allí se determinó el gradiente de ahorro de tiempo medio de viaje entre usar la red dispuesta para el transporte privado y la del SETP; también se incluyeron, para éste análisis comparativo, las variables de población y estrato socio-económico.

Palabras Clave: Accesibilidad, Transporte Público, Movilidad, isócronas.

ABSTRACT

ANALYSIS OF GEOGRAPHIC ACCESSIBILITY OF THE PUBLIC TRANSPORT STRATEGIC SYSTEM (SETP) IN THE CITY OF ARMENIA

This paper determines the impact generated by the Strategic System of Public Passenger Transportation - SETP, in the population of the city of Armenia, in terms of Geographic Accessibility, according to the routes projected on the road network destined for the circulation of same. In turn, a sociodemographic analysis is carried out, in order to determine which strata are benefiting in terms of average travel times, with the implementation of the SETP, and in this way present a tool for decision making, in relation to the road infrastructure projects that are currently being executed to improve the mobility of the vehicles willing to operate the System, as well as the possible reorganization of the planned routes. On the other hand, an analysis of geographical accessibility of the basic road network of the city of Armenia, including the means of private transport, was carried out in order to make a comparison between the latter and the SETP. There, the average travel time saving gradient was determined between using the network arranged for private transport and that of the SETP; also included, for this comparative analysis, the variables of population and socio-economic stratum.

Keywords: Accessibility, Public Transport, Mobility, isochronous.

Contenido

Pág.

Contenido ..... **VI**

Lista de figuras ..... **VII**

Lista de tablas ..... **VIII**

Introducción **9**

1. Objetivos **13**
1.1 Objetivo General 13
1.2 Objetivos específicos 13

2. Marco Teórico **14**
2.1 Marco conceptual 14
2.2 Marco espacial y demográfico 17
2.3 Sistema Estratégico de Transporte Público de Pasajeros en la ciudad de Armenia (SETP)20
2.3.1 Rutas Proyectadas del Sistema 21

3. Metodología **25**
3.1 Selección de información secundaria 25
3.1.1 Puesta a punto de la red vial de Armenia 26
3.1.2 Rutas proyectadas del SETP 27
3.1.3 Obtención de las velocidades de operación 28
3.2 Procesamiento de redes viales: 31
3.3 Cálculo de los tiempos medios de viaje: 32
3.4 Análisis geoestadístico y evaluación de las curvas isócronas de la red del SETP 33
3.5 Análisis de cobertura espacial de las curvas isócronas obtenidas en relación con la variable población por estrato socioeconómico 34
3.6 Análisis geoestadístico y evaluación de las curvas isócronas de la red de transporte privado35
3.7 Análisis geoestadístico y evaluación de las curvas gradientes de accesibilidad 35
3.8 Análisis de cobertura espacial de las curvas gradientes de tiempo medio de viaje en relación con la variable población por estrato socioeconómico 36

4. Resultados **38**
4.1 Análisis geoestadístico y evaluación de las curvas isócronas de la red del SETP 38
4.2 Análisis de cobertura espacial de las curvas isócronas obtenidas en relación con la variable población por estrato socioeconómico 42
4.3 Accesibilidad Media Global en la red de transporte privado de Armenia 48
4.4 Gradiente de ahorro entre la red del SETP y la red de Transporte Privado 50
4.5 Análisis de cobertura espacial de las curvas gradientes de tiempo medio de viaje en relación con la variable población por estrato socioeconómico 53

5. Conclusiones y recomendaciones **59**

6. Bibliografía **63**

Lista de figuras

Pág.

Figura 1 Localización ciudad de Armenia 18
Figura 2 Estratificación socioeconómica de Armenia. 19
Figura 3 Plano de comunas de Armenia 20
Figura 4 Recorrido de rutas del SETP por la red de la Ciudad de Armenia 24
Figura 5 Red vial de Armenia – Deprimido del Parque La Constitución 26
Figura 6 Tabla de Atributos de ArcMap sobre la red vial de Armenia con la selección de las rutas del SETP 27
Figura 7 Tabla de Atributos de ArcMap sobre la red vial de Armenia con la selección de la red peatonal 28
Figura 8 Velocidades de operación ingresadas a la red 31
Figura 9 Proyección de coordenadas a WGS1984 en ArcGis de la red vial de Armenia. 32
Figura 10 Metodología de investigación 37
Figura 11 Curvas isócronas de la Accesibilidad Media Global de la red proyectada del SETP para la ciudad de Armenia 38
Figura 12 Ojiva acumulada de cobertura de área de la red del SETP 40
Figura 13 Cobertura de curvas isócronas de la Accesibilidad Media Global de la red proyectada del SETP en las comunas de Armenia 43
Figura 14 Ojiva acumulada de cobertura de la población de la red del SETP 44
Figura 15 Ojiva acumulada de cobertura de la población de la red del SETP 45
Figura 16 Ojiva acumulada de cobertura de la población por estrato socioeconómico de la red del SETP 46
Figura 17 Curvas isócronas de la Accesibilidad Media Global de la red de transporte privado para la ciudad de Armenia 48
Figura 18 Ojiva acumulada de cobertura de área de la red de Transporte privado para la ciudad de Armenia 50
Figura 19 Gradiente de ahorro entre la red del SETP vs la red del transporte privado ... 51
Figura 20 Cobertura de curvas gradiente con él % de ahorro en tiempos de viaje entre el SETP y el Transporte Privado. 53
Figura 21 Cobertura de población por estrato socioeconómico del % de ahorro de tiempo promedio de viaje entre el SETP y Transporte Privado 54
Figura 22 Cobertura de población en relación con la división del SETP/Transporte Privado 56
Figura 23 Comparación del TPV entre el SETP y el Transporte privado por estrato socioeconómico 57

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2 Población y estrato por comunas de la ciudad de Armenia..... 19
Tabla 1 Velocidades de operación de las rutas proyectadas para el SETP de la ciudad de Armenia..... 29
Tabla 3 Porcentaje de cobertura de área de las curvas isócronas para la red del SETP 40
Tabla 4 Porcentaje de la población cubierta por las curvas isócronas..... 44
Tabla 5 Porcentaje de cobertura de área de las curvas isócronas para la red de transporte privado 49
Tabla 6 Cobertura de población en relación con la división del SETP/Transporte Privado 55

Introducción

Como la mayoría de los países de América Latina, en los últimos cincuenta años Colombia ha registrado una fuerte tendencia a la urbanización. Mientras en 1950 la población urbana constituía el 39%, en 2005 ascendía aproximadamente a 76%. Conforme a esta tendencia, se estima que, para 2020, más del 80% de la población colombiana estará localizada en las ciudades (Departamento Nacional de Planeación, 2007)

La ciudad de Armenia, sin ser ajena a esta situación, entre los años 2015 y 2017 se extendió el área licenciada para la construcción con una tasa de crecimiento del 33% anual (Camacol, 2017), lo que implica entre otros aspectos, la necesidad de una adecuada planeación en lo competente al territorio y especialmente en lo relacionado con la infraestructura vial y la movilidad.

Es inminente, que con el acelerado proceso de urbanización, se incremente la circulación de vehículos por la ciudad como resultado de la mayor demanda de viajes, ocasionando una movilidad ineficiente desde el punto de vista del aumento en los tiempos de viaje de la población. Como lo expresa Escobar, en lo relacionado con la planificación territorial, los sistemas de transporte público cumplen un importante papel en la búsqueda de la disminución en el uso del vehículo privado, que en últimas, mejora la movilidad urbana en una ciudad. (Escobar Garcia, 2008). Como contraste a este criterio, en la ciudad de Armenia entre los años 2009 y 2014, el parque automotor se ha incrementado un 268% para motos y 63% para carros (García Velazquez & Escobar García, 2016), cifra que refleja la disminución en la capacidad y nivel de servicio de las vías, que como se mencionó al inicio, impacta directamente el tiempo de desplazamiento de un punto de la ciudad a otro.

A su vez, en el PND 2010 - 2014 se registran datos preocupantes en relación con el uso del Transporte Público Colectivo Urbano en las ciudades Colombianas, debido al cambio sustancial de algunas variables macroeconómicas que ha incentivado la compra y uso del vehículo privado como medio principal de desplazamiento, llevando a la consecuente disminución del porcentaje de viajes en TPCU, que para el 2002 era del 78% y ya en el 2012 era del 51% (Cardona, et al., 2017).

No obstante, desde años atrás, el Gobierno Nacional ha generado diferentes estrategias para el desarrollo de proyectos enmarcados en el Transporte Público, como lo es el documento Compes 3167 “Política para mejorar el servicio de transporte público urbano

de pasajeros", en el que se destaca: "incentivar a las ciudades en la implantación de sistemas de transporte que atiendan las necesidades de movilidad de la población bajo criterios de eficiencia operativa, económica y ambiental. (Departamento Nacional de Planeación, 2002).

En el Caso de Armenia, desde el año 2009 se inició la implementación del Sistema Estratégico de Transporte Público de pasajeros [SETP], con el objetivo principal de contar con un servicio de transporte de calidad y eficiente. Según el documento Conpes 3572, para el año 2012 se debería contar con la infraestructura requerida para el desarrollo del sistema, así como un reordenamiento de la totalidad de las rutas. Lo anterior, previendo una buena planificación desde el ámbito de la operación, la infraestructura y lo institucional.

Como soporte técnico inicial para la implementación del sistema de transporte público, entre los años 2005 a 2007 se adelantó por parte del Municipio de Armenia la "Matriz origen – destino de la ciudad de Armenia" y la "Actualización del Plan Vial en Tránsito y Transporte para el Municipio de Armenia" (Departamento Nacional de Planeación, 2009), donde se realizó una clasificación de la red vial de la ciudad que definiera, entre otros aspectos, los corredores principales para el transporte público de pasajeros.

Por otra parte, los estudios de accesibilidad geográfica juegan un papel fundamental para la elaboración de políticas y toma de decisiones relacionadas con el ordenamiento territorial y el transporte, tanto a nivel regional como urbano. Escobar y Urazán, afirman que en los últimos 50 años el concepto de accesibilidad ha tenido gran importancia en la planificación territorial. (Escobar & Urazán, 2014). Así mismo, Según Bocarejo, cuando se incluyen los indicadores de accesibilidad en los análisis de transporte se pueden considerar algunas variables de tipo social y económico a nivel individual, fundamentales para la toma de decisiones en la elaboración de políticas de Transporte Público. (Bocarejo, Escobar, Oviedo, & Galarza, 2016)

Ahora bien, los estudios sobre accesibilidad al transporte público, se pueden considerar como un elemento importante para la especificación de los modelos de participación en actividades y comportamiento de viaje, la evaluación del nivel de servicio en transporte público, el análisis de equidad y el diseño de la provisión de transporte público (Lei & Goulias, 2012) .Estos últimos autores, describen que el atractivo relativo del transporte

público depende críticamente de su desempeño en términos de la accesibilidad proporcionada para vincular a las personas con oportunidades de empleo y actividades, y en el desarrollo de la investigación, realizan una comparación entre la accesibilidad del transporte público y la del transporte privado. En Holanda, donde el transporte en bicicleta es altamente utilizado por su población, se realizó un estudio de accesibilidad, con el fin de evaluar los impactos de las políticas de integración de bicicletas en el uso de trenes y accesibilidad laboral para los usuarios del transporte público (Geurs, La Paix, & Van Weperen, 2016) . En este estudio se concluyó que al mejorar la calidad en las rutas y estacionamientos para las bicicletas, aumenta el uso del transporte público y por consiguiente la accesibilidad al trabajo de los usuarios de este tipo de transporte.

En Colombia, varios autores han desarrollado estudios de accesibilidad a los diferentes sistemas de transporte público; como es el caso del análisis de accesibilidad al Sistema Integrado de Transporte Masivo de Bogotá (Bocarejo, Escobar, Oviedo, & Galarza, 2016), en el cual se enfocaron principalmente en el sistema tarifario y determinaron que para este estudio de caso, el costo del transporte es la variable más importante para explicar los cambios en la accesibilidad más allá del ahorro de tiempo de viaje; un indicador importante para tomar decisiones a nivel administrativo y gubernamental en cuanto a las posibles alternativas para disminuir costos de operación y mejorar el sistema tarifario. Así también, para la ciudad de Manizales se determinaron algunos beneficios evaluados a partir de un análisis de accesibilidad territorial del sistema de transporte público tipo cable (Escobar & García, 2011), donde se obtuvo como principal conclusión la relación entre el ahorro obtenido en tiempo promedio de viaje y el valor invertido para obtener tal tiempo de ahorro, con la construcción de la infraestructura de cable aéreo.

Como antecedente en la ciudad de Armenia, se realizó en 2017 un estudio sobre los impactos en la accesibilidad con la ejecución de algunas obras de valorización propuestas por la administración local. Este estudio realizado por (Garcia & Escobar, 2017), abarca toda la red de transporte de Armenia, tanto privado como público, promediando las velocidades de cada uno de estos modos de transporte.

En el presente trabajo, se pretende realizar un análisis de accesibilidad territorial con las rutas proyectadas del Sistema Estratégico de Transporte Público de pasajeros de la ciudad de Armenia, relacionando variables demográficas y socioeconómicas (Cardona, Zuluaga,

& Escobar, 2017), como población, comunas y estrato . Así mismo se realizará un análisis comparativo entre la accesibilidad media global de la red del SETP y la red del transporte privado, tomando como variable fundamental los tiempos medios de viaje al interior de cada red. Como resultado se pretenden obtener una serie de mapas con curvas isócronas que mediante un análisis geoestadístico reflejen los resultados conseguidos al realizar la accesibilidad media global en cada uno de los escenarios de estudio y al final presentar una serie de conclusiones y recomendaciones que podrán orientar y aportar en la planificación y toma de decisiones en materia de proyectos de infraestructura y operación del SETP de la ciudad de Armenia.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar la implementación del Sistema Estratégico de Transporte Público (SETP) en la Ciudad de Armenia, en términos de accesibilidad geográfica Urbana.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar, mediante una muestra, los tiempos medios de viaje del SETP de Armenia.
- Realizar un análisis geoestadístico de la red actual de rutas del SETP de Armenia.
- Analizar la cobertura espacial a través de las curvas Isócronas en relación con la variable población por estrato socioeconómico.
- Realizar un análisis geoestadístico y evaluación de las curvas gradientes de cambio en tiempos medios de viaje, relacionando la red vial básica y la red del SETP de Armenia.
- Analizar la cobertura espacial de las curvas gradientes de tiempo medio de viaje en relación con la variable población por estrato socioeconómico, para la red vial básica y la red del SETP de Armenia.

2. Marco Teórico

2.1 Marco conceptual

En Colombia, los Sistemas Estratégicos de Transporte Público [SETP] inician bajo la estrategia de ciudades amables, señalada en el Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010, la cual tiene dentro de sus componentes "Transporte urbano y movilidad", que busca oportunidades seguras de movilidad para los ciudadanos, bajo principios de economía y correspondiendo a las necesidades de ordenamiento y planificación del territorio (Departamento Nacional de Planeación, 2007). Luego, el decreto 3422 de 2009 por el cual se reglamentan los SETP, los define como aquellos servicios de transporte colectivo integrados y accesibles para la población en radio de acción, que deberán ser prestados por empresas administradoras integrales. A su vez, en el Artículo No. 9 habla sobre el modelo de operación, donde asegura que estos sistemas funcionarán bajo la modalidad de red de servicios, conformados por rutas jerarquizadas, diseñadas de conformidad con los estudios técnicos respectivos (Departamento Nacional de Planeación, 2009).

Ahora bien, en el marco del concepto de la Accesibilidad, desde finales de la década de los 50, se han realizado un sin número de estudios representativos que la definen de diferentes maneras. Dentro de los conceptos más conocidos de accesibilidad, se destacan "el potencial de oportunidades para la interacción" (Hansen, 1959), "La facilidad para alcanzar cualquier zona de actividad usando un sistema de transporte determinado" (Dalvi & Martin, 1976), "facilidad con la que se pueden alcanzar actividades desde una ubicación determinada utilizando un sistema de transporte particular" (Morris, Dumble, & Wigan, 1979), entre otros.

En otros estudios, la accesibilidad es definida como la "*forma de 'medir' el alcance y la calidad de la interacción entre los patrones de desarrollo del suelo en un área determinada y los sistemas de transporte que la atienden*" (Cascetta & Papola, 2009), así mismo, "*expresa la relación entre el sistema de actividades en un área territorial y el sistema de transporte que lo presta*" (Cascetta & Papola, 2009).

Por otro lado, hablando particularmente sobre el transporte de pasajeros, se puede definir la accesibilidad como “la medida en que los sistemas de transporte y uso del suelo permiten que (grupos de) individuos puedan llegar a actividades o destinos por medio de (una combinación de) modo (s) de transporte” (Geurs & Van Wee, 2004).

De igual forma, desde los primeros estudios de accesibilidad, se determinaron diferentes niveles en los cuales se categoriza la accesibilidad. El primero se centra en medir la capacidad que tiene un individuo en desplazarse desde un punto determinado a otro, sin tener en cuenta características de la población o de las infraestructuras. Este tipo de accesibilidad se conoce como accesibilidad relativa, la cual describe la relación o grado de conexión entre un punto de origen y uno de destino (Morris, Dumble, & Wigan, 1979). En 1971, Ingram definió la accesibilidad relativa como “el grado en que dos lugares (o puntos) en la misma superficie están conectados” (Ingram, 1971).

Así mismo, Morris (1979) habla en su investigación del segundo nivel de accesibilidad, la cual consiste en una medida del total de oportunidades de viaje desde un punto determinado, denominada como Accesibilidad Integral. “La accesibilidad integral se define para un punto dado como el grado de interconexión con todos los otros puntos en la misma superficie. La forma operacional de accesibilidad integral se considera dependiente de la derivación de un conjunto de accesibilidad relativa de un punto (Ingram, 1971). Por otro lado, estudios más recientes han definido el tercer tipo de accesibilidad, la cual es el promedio de todas las accesibilidades integrales de todos los nodos definidos en el área de estudio y representa el grado de conexión de toda la red (Escobar & Garcia, 2012), esto significa que mide el grado de accesibilidad desde un nodo i a todos los otros nodos de una determinada red y es conocido como accesibilidad media global.

Así como los niveles de la accesibilidad, se identifican 4 perspectivas que se relacionan con la medición de esta: Medidas basadas en infraestructura, las cuales son usadas comúnmente para la medición de impactos generados en sistemas de transporte; Medidas basadas en la ubicación, que se usan frecuentemente para la planificación urbana y estudios geográficos; medidas basadas en la persona, que se centran principalmente en el individuo y las actividades que este puede realizar en un momento determinado; medidas basadas en la utilidad, las cuales se centran principalmente en los beneficios

económicos que obtienen las personas con el acceso a las actividades en diferentes espacios. (Geurs & Van Wee, 2004).

La accesibilidad global fue descrita por (Geurs & Ritsema Van Eck, 2001) como accesibilidad basada en infraestructura, que analiza el rendimiento o servicio de la infraestructura vial, midiendo el tráfico o la velocidad promedio en la red, obtenida como el promedio de los tiempos de viaje promedio de todos los nodos en una red de infraestructura de transporte (Escobar G. & Garcia O., 2012). A continuación se describe este tipo de medida de accesibilidad, en donde se evidencia la relación con la planificación del transporte, pero también se identifican algunos vacíos metodológicos:

Medidas de accesibilidad basadas en la infraestructura: Analizan el rendimiento o el nivel de servicio de la infraestructura de transporte (Geurs & Östh, 2016). Las medidas de accesibilidad que se basan en la infraestructura, comúnmente son usadas por diferentes países desarrollados para la estructuración de políticas de transporte. Dentro de esta medida de accesibilidad, se tienen en cuenta algunas variables, tales como tiempos de viaje, velocidad de operación, congestión y conectividad basadas en la teoría de grafos. La principal ventaja de las medidas de accesibilidad basadas en infraestructura, es la disponibilidad de la información primaria y la interpretación de los datos al momento del análisis de algún tipo de investigación. Sin embargo, los resultados obtenidos no satisfacen completamente la realidad, debido a que este tipo de estudios no incorporan el uso del suelo ni las características individuales (Geurs & Van Wee, 2004). En un estudio realizado por Linneker y Spence (1992) se realiza una comparación de las medidas de accesibilidad para el análisis de impacto sobre la autopista M25 de Londres, la cual es de las más importantes y más transitadas de Europa. En este estudio se evidencia que “el centro de Londres tiene los costos de acceso más altos en el Reino Unido, pero el nivel más alto de acceso potencial a los empleos, a pesar del alto costo de viaje” (Linneker & Spence, 1992).

Otras medidas de accesibilidad, son las basadas en la ubicación, que describen el nivel de accesibilidad a las actividades distribuidas espacialmente y generalmente en un nivel macro. Se usan generalmente en planificación urbana y estudios geográficos; las medidas basadas en la persona analizan las actividades en las que un individuo puede participar en un momento dado y mide al individuo dentro del entorno, es decir, su ubicación,

duración de actividades obligatorias, presupuestos de tiempo para actividades flexibles y velocidad permitida por el sistema de transporte; y las medidas basadas en la utilidad, que analizan los beneficios que las personas obtienen del acceso a las actividades distribuidas espacialmente y su origen en principalmente económico.

Para el presente estudio y bajo esta revisión de la literatura relacionada con la definición de accesibilidad: niveles y perspectivas de medición, se concluye que el presente estudio se enfocará básicamente en el nivel de accesibilidad media global y se evaluará el componente de transporte basado en medidas relacionadas con la infraestructura, pues para el caso que nos ocupa, lo que se pretende es analizar el impacto generado por la infraestructura ofrecida para el SETP en términos de tiempos promedio de viaje.

2.2 Marco espacial y demográfico

Armenia es la capital del Departamento del Quindío, que se ubica en la región Andina de Colombia. La ciudad cuenta con una extensión de 11.713,8 hectáreas, de las cuales tan solo 2.800 hacen parte del perímetro urbano. No obstante, aproximadamente el 97 % del total de su población vive en la urbe, que cuenta con 294 barrios. (Curaduría Urbana No. 2 de Armenia, 2017).

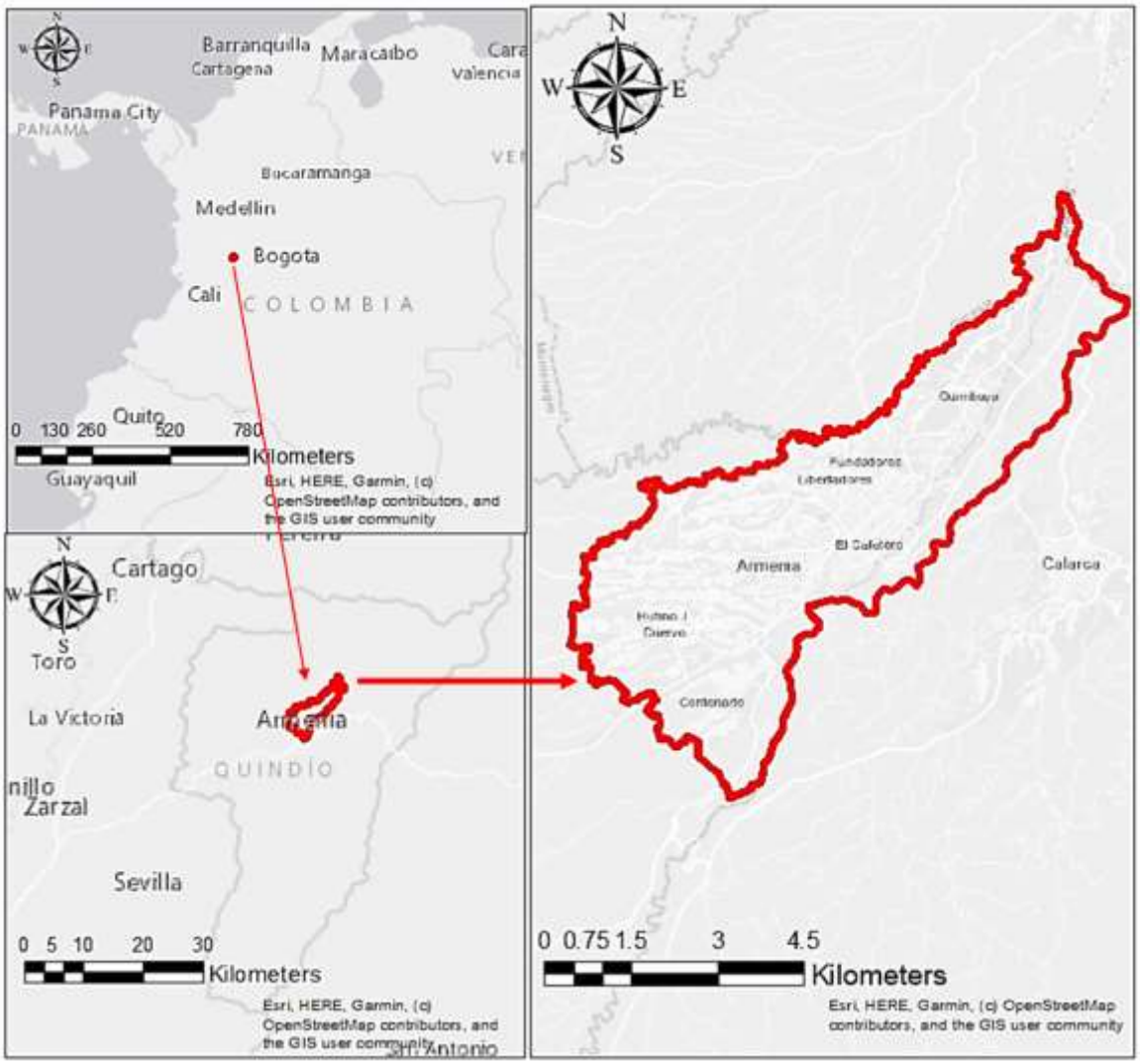

Figura 1 Localización ciudad de Armenia

Fuente: (Sociedad Geográfica de Colombia, 2017)

En lo relacionado a su población, según el Departamento Administrativo Municipal, Armenia cuenta con 299.712 habitantes, de los cuales el 97.32% se localizan en la cabecera. Así mismo, cabe anotar que el 80% de la población se encuentra en estratos 1, 2 y 3 y tan solo el 20% en estratos 4, 5 y 6. (Departamento Administrativo de Planeación, 2016)

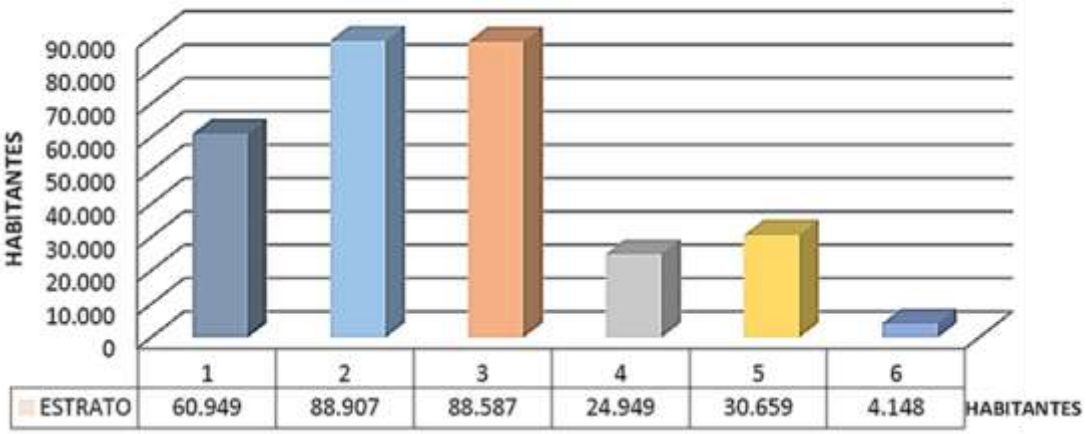

Figura 2 Estratificación socioeconómica de Armenia.

Fuente: (Departamento Administrativo de Planeación, 2016)

Por otro lado, la ciudad de Armenia se encuentra dividida por las siguientes comunas:

Tabla 1 Población y estrato por comunas de la ciudad de Armenia

	NOMBRE DE COMUNA	% POB_TOTAL	POB_COMUNA	ESTRATO_PREDOMINANTE
1	Centenario	10.8%	31431	EST1
2	Rufino J. Cuervo	19.6%	57281	EST2
3	Alfonso López	12.0%	34902	EST1
4	Francisco de Paula Santander	4.5%	13192	EST1
5	El Bosque	5.7%	16593	EST3
6	San José	14.0%	40790	EST2
7	El Cafetero	5.6%	16327	EST4
8	Libertadores	4.0%	11630	EST3
9	Fundadores	5.3%	15384	EST3
10	Quimbaya	18.6%	54157	EST5
	TOTAL	**100.00%**	**291687**	

Fuente: Elaboración propia a partir de (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2017)

Según la tabla anterior, la comuna No. 10. “Quimbaya” es la comuna de mayor área y la segunda de mayor población, en la cual predominan los predios estrato 5. Por otro lado, los estratos 1 y 2 predominan en la población de toda la ciudad.

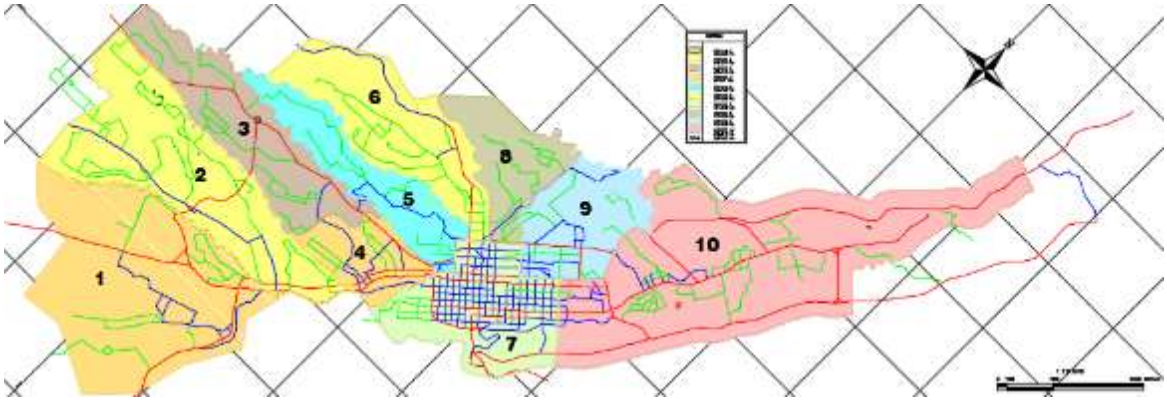

Figura 3 Plano de comunas de Armenia

Fuente: (Universidad del Quindío, 2005)

Según proyecciones de población realizadas por el Dane en el año 2001, Armenia contaría con una población mayor a 300.000 habitantes, categorizándola según el documento Conpes 3167 *"Política para mejorar el servicio de transporte público urbano de pasajeros",* en el segundo grupo de ciudades (entre 300.000 y 600.000 habitantes), que manifiestan problemas en los sistemas de transporte. El primer grupo de Ciudades, con población menor a 300.000 habitantes presentan problemas de transporte público de baja intensidad y por el contrario, el tercer grupo de ciudades con población mayor a 600.000 habitantes presentan problemas serios en el transporte público que requieren un desarrollo importante en la infraestructura vial y son ciudades objeto para la implementación de los Sistemas Integrados de Transporte Masivo, como es el caso de Bogotá.

Para el caso que nos ocupa, Armenia, según este documento Conpes hace parte de las 9 ciudades de Colombia que serían objetivo para el apoyo de la Nación en la implementación del Sistema Estratégico de Transporte Público Urbanos de Pasajeros.

2.3 Sistema Estratégico de Transporte Público de Pasajeros en la ciudad de Armenia (SETP)

Como se mencionó en capítulos anteriores, el SETP de la ciudad de Armenia, inició con la aprobación del documento Conpes 3572 en el año del 2009, con el objetivo principal de "permitir a la población del municipio de Armenia, contar con servicio de transporte de

calidad, oportuno, confiable, con condiciones de accesibilidad, con costos acordes, y eficiente en la prestación del servicio" (Departamento Nacional de Planeación, 2009)

Así mismo, dentro del anterior documento, se plantearon tres características principales: (i) Operacionales, en donde se establece un reordenamiento de la totalidad de las rutas, de acuerdo con la intención de viaje de los usuarios, logrando una mayor cobertura y accesibilidad; (ii) Infraestructura, en la cual se optimizarán 37 km de vías y se definirán algunos carriles exclusivos para los vehículos del sistema sobre las vías arterias principales, así como construcción de equipamiento urbano como paraderos con espacio público, terminales de ruta, terminales de intercambio, etc; (iii) Institucionales con la incorporación de elementos como sistema de recaudo centralizado, sistema de gestión y control de flota, administrador financiero y asistente tecnológico.

Como complemento, la Administración Municipal en conjunto con las tres empresas operadoras de buses: Buses Armenia S.A., Cooperativa de Buses Urbanos del Quindío y Transportes Urbanos Ciudad Milagro S.A., implementó un modelo de operación que se denominó Transporte Integrado Operador de Armenia (TINTO) que unifica el modelo de flota de los buses que se usan actualmente para la implementación del SETP.

Para la etapa de diseño, implementación y construcción del sistema se conformó una gerencia liderada por la Empresa Industrial y Comercial del Estado AMABLE, la cual se encuentra ejecutando las diferentes acciones enmarcadas en las tres características mencionadas anteriormente, especialmente en la ejecución de las obras de infraestructura vial por donde transita la flota de buses del SETP. A la fecha se han ejecutado más de 30 proyectos de infraestructura que comprenden en la construcción de tramos nuevos de vías, rehabilitación de la infraestructura existente, construcción de andenes, construcción de Paraderos con Espacio Público – PEP, Construcción del Centro de Control Semafórico, etc.

2.3.1 Rutas Proyectadas del Sistema

Por otro lado, de acuerdo con el Decreto 100 de 2009 las rutas proyectadas desde esa fecha para la operación del SETP de la ciudad de Armenia son las siguientes:

Ruta 1: Guaduales de la Villa – Terminal de intercambio norte y viceversa

Ruta 2: Aeropuerto el Edén – Glorieta las Palmas y viceversa

Ruta 3: Rojas Pinilla – Parque Aborígenes y viceversa

Ruta 4: Inspección de Policía Puerto Espejo – Hospital de Zona y viceversa

Ruta 6: Bosques de Gibraltar – Parque Aborígenes y viceversa

Ruta 8: La Brasilia – Urbanización Villa Andrea y viceversa

Ruta 9: Aeropuerto el Edén – Hospital de Zona y viceversa

Ruta 10: Las Colinas – Hospital de Zona y viceversa

Ruta 16: Villa Liliana – Hospital de Zona y viceversa

Ruta 19: Centenario – Terminal de Intercambio de Occidente y viceversa

Ruta 22: Ciudadela la Fachada – Glorieta Vásquez Cobo y viceversa

Ruta 23: La Pavona – Terminal de Intercambio Norte y viceversa

Ruta 26: Arco Iris – Sena Centro de la Construcción y viceversa

Ruta 27: Terminal de Intercambio de Occidente – Terminal de Intercambio Norte y viceversa

Ruta 28: Mercedes del Norte – Plan Piloto de Vivienda Nueva Ciudad Milagro y viceversa

Ruta 29: El Silencio – Terminal de Transportes y viceversa

Ruta 35: Ciudadela La Patria – Parque Aborígenes y Viceversa

Ruta 36: Inspección de Policía Puerto Espejo – Hospital de Zona y Viceversa

Ruta 38: Limonar – Terminal de Intercambio Norte y Viceversa

Ruta 39: Glorieta Tres Esquinas - Terminal de Intercambio Norte y Viceversa

Ruta 40: Barrio Nuevo Berlín – Los Quindos y viceversa

Ruta 41: Barrio Simón Bolívar – Hospital de Zona y viceversa

Ruta 42: Ciudadela la Fachada – Plan Piloto de Vivienda Nueva Ciudad Milagro

Ruta 43: Terminal de Intercambio de Occidente – Yulima y viceversa

Ruta 44: Limonar – Hospital del Sur y viceversa

Ruta 45: Ciudadela Simón Bolívar – Parque aborígenes y viceversa

Ruta 46: Miranda – María Cristina y viceversa

Fuente: (Alcaldía de Armenia, 2009)

A pesar de que estas rutas fueron proyectadas en el 2009, a la fecha aún no se encuentran totalmente actualizadas, teniendo en cuenta la dependencia de la culminación de todas las obras de infraestructura para la puesta en marcha del sistema. Sin embargo, el presente estudio, se desarrolla con base en las rutas plasmadas en el Decreto 100 de 2009.

En la Figura 4, se visualizan los recorridos proyectados de todas las rutas mencionadas anteriormente a lo largo de toda la ciudad de Armenia. Tanto la ruta No.2 como la No. 9 son las únicas rutas que salen del perímetro urbano de la ciudad. Estas rutas terminan su recorrido en el corregimiento El Caimo y Aeropuerto El Edén respectivamente.

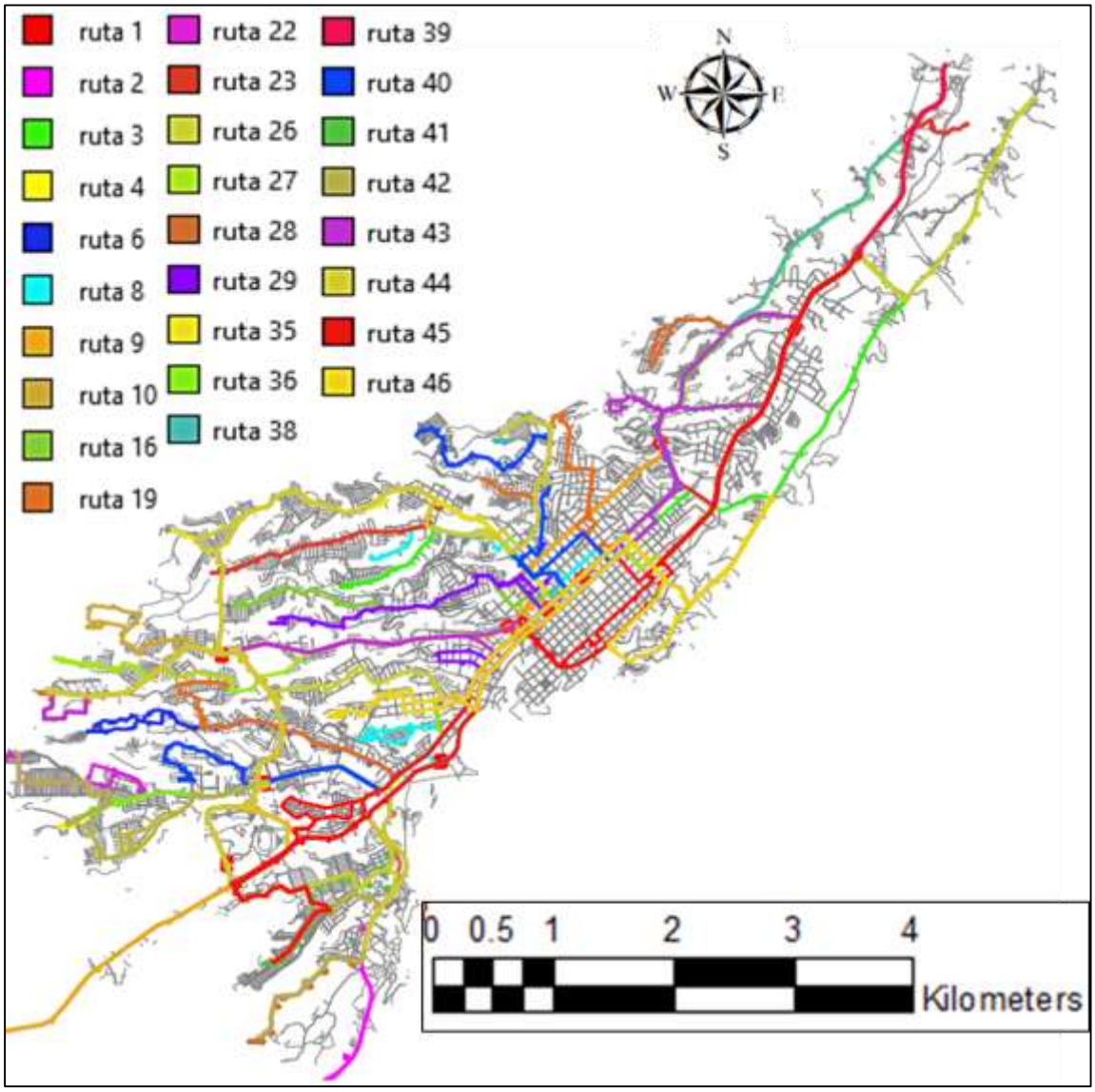

Figura 4 Recorrido de rutas del SETP por la red de la Ciudad de Armenia

Fuente: Elaboración propia

Además de la modificación de las rutas tradicionales que operaban el sistema de transporte colectivo, se modificaron los recorridos urbanos de las rutas del transporte público intermunicipal de la ciudad, con el fin de racionalizar el uso de la infraestructura vial urbana, de mejorar la movilidad y priorizar el SETP. Dentro de estos cambios, se restringió que este tipo de transporte intermunicipal transitara por los carriles exclusivos del SETP y se obligó al uso de terminales de intercambio.

3. Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos del proyecto se realizaron 4 etapas consecutivas, que se iban enlazando precediendo una de la siguiente. Como primera medida se realizó la recolección y selección de información secundaria relacionada con la red vial de la ciudad de Armenia, las rutas proyectadas del SETP, las velocidades de operación de las rutas y las de caminata. Acto seguido se procedió con los parámetros para el cálculo de la accesibilidad media global, especialmente con el cálculo de los tiempos de viaje entre nodos.

Luego de realizar la accesibilidad media global, se procede a presentar los resultados mediante un mapa de curvas isócronas y se evalúa la cobertura de las mismas en relación con área y población por estrato socioeconómico.

En último lugar, realiza el cálculo de la accesibilidad media global de la red de transporte privado, con el fin de realizar un análisis comparativo a través del gradiente de ahorro de tiempo medio de viaje con relación a la accesibilidad obtenida con la red del SETP.

3.1 Selección de información secundaria

Como primera instancia se obtuvo la red vial básica de la ciudad de Armenia en formato .shp, a través de la oficina de Movilidad Urbana Sostenible de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Esta red se encontraba en coordenadas proyectadas Magna Colombia Oeste, donde se realizó la puesta a punto de la misma. Por otro lado, desde la Empresa Amable, la cual es la encargada de la Operación del SETP en la ciudad de Armenia, se obtuvo información sobre las rutas de transporte público, los recorridos y velocidades de operación de las mismas. Para el cálculo de las velocidades de caminata se extrajo información de tres diferentes artículos de investigación y se promediaron los datos encontrados.

3.1.1 Puesta a punto de la red vial de Armenia

La puesta a punto de la red se realizó en el software ArcGis 10.4 y consistió en la revisión de algunas infraestructuras viales nuevas que se construyeron pero no se encontraban en el plano y que además influían directamente en los cálculos a realizar. Estos arcos de las infraestructuras nuevas, se crearon y a su vez se les adicionaron todos los atributos representativos como dirección y velocidad. Así mismo, se ingresaron arcos que correspondían solo a caminos peatonales y que en la red inicial no se encontraban. Lo anterior, con el fin de obtener todas las posibles rutas de caminata que conducen hacia los arcos por donde transita la red de transporte público.

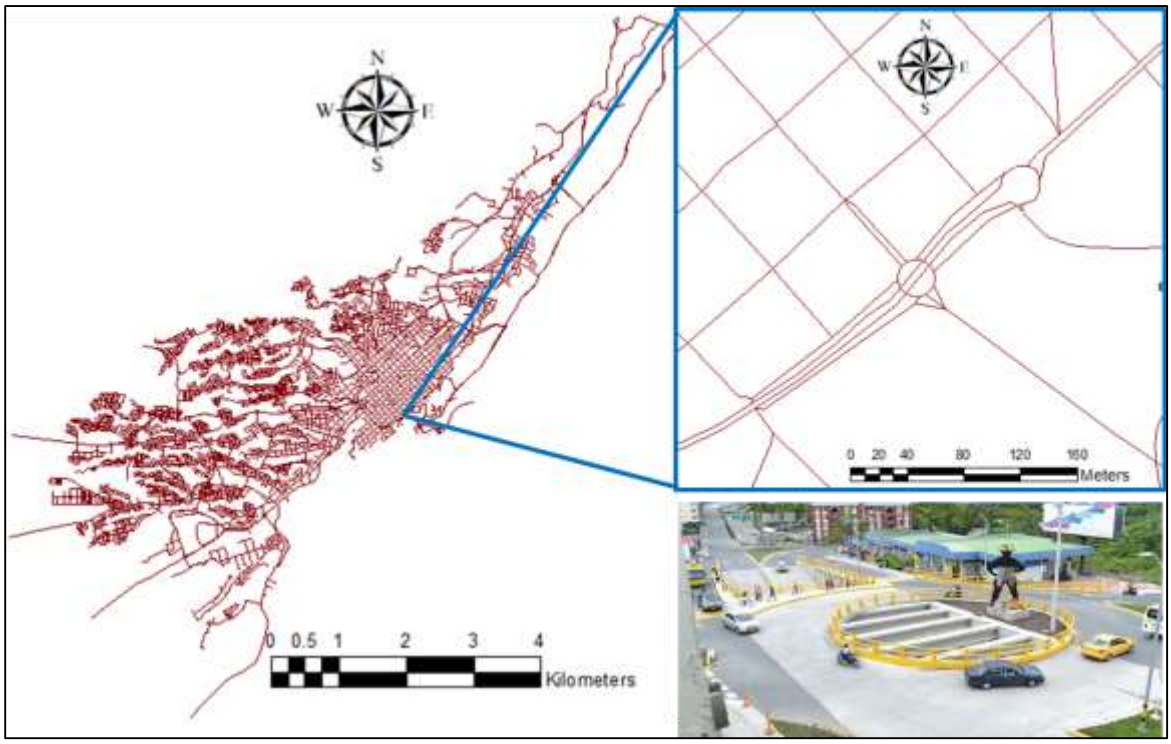

Figura 5 Red vial de Armenia – Deprimido del Parque La Constitución

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5 se hace referencia a una de las modificaciones que se realizaron en la red vial, la cual corresponde al deprimido ubicado en la Carrera 11 con calle 20 y que antiguamente se encontraba una glorieta. Estos arcos son importantes, teniendo en cuenta que las vías que pasa por allí son arterias secundarias y además hacen parte de la conexión principal entre la ciudad de Armenia y el Municipio de Calarcá.

Continuando con la revisión de esta red, se verificaron los sentidos de circulación actuales con los que se visualizaban en la red de trabajo. Algunas direcciones fueron modificadas, teniendo en cuenta que los sentidos de circulación actuales diferían de los que se tenía la red.

3.1.2 Rutas proyectadas del SETP

Una vez terminada la puesta a punto de la red, se ingresaron en la tabla de atributos el paso por los arcos de las rutas proyectadas del SETP de Armenia. Para tal fin, se crearon inicialmente 3 columnas. La primera “T_P” consistía en definir con los números 1 y 0, si por el arco seleccionado pasaba alguna ruta de transporte público o no respectivamente; La segunda columna “No_R” permitía agregar el número total de rutas que pasan por cada arco; finalmente, la columna “Rutas_2” contenía los nombres de cada ruta que pasaba por los arco y además se agregaba tantas veces como pasara por el arco seleccionado. En la Figura 2 se observa que las columnas seleccionadas hacen parte de los datos ingresados con la información de las rutas del SETP. Esta información de rutas, fue obtenida del decreto 100 de 2009 y de los planos suministrados por la Universidad del Quindío, de acuerdo con la consultoría realizada sobre la Actualización del Plan Vial de Armenia en el 2010 (Municipio de Armenia, 2009).

Table

RED_ARMENIA_TP_MCO

OBJECTID	LAYER	ONEWAY	CATEGORIA	JERARQUIA	VELOCIDAD	TIEMPO	LONGITUD	SHAPE_LENG	T_P	No_R	RUTAS_2
0		B		1	20	0.234619	0.078208	78.296136	1	2	R4_R4_R36_R36
1920	VAP	B	AVENIDA	1	19	0.231105	0.063719	63.718966	1	4	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R42_R42
0		B		1	19	0.204697	0.064821	64.820841	1	4	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R42_R42
0		B		1	19	0.202562	0.064145	64.144578	1	4	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R42_R42
1919	VAP	B	AVENIA	1	19	0.244429	0.077403	77.482562	1	4	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R42_R42
1929	VAP	B	AVENIDA	1	19	0.146282	0.046956	46.955953	1	4	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R42_R42
1922	VaP	B	CALLES	1	19	0.09277	0.029377	29.377197	1	4	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R42_R42
1929	VAP	B	AVENIDA	1	19	0.236073	0.074756	74.756414	1	4	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R42_R42
1920	VAP	B	AVENIDA	1	19	0.231105	0.009484	9.484374	1	4	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R42_R42
1968	VAP	B	AVENIDA	1	20	0.215406	0.071802	71.802037	1	6	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R40_R40_R42_R42_R42_R42
1929	VAP	B	AVENIDA	1	19	0.178528	0.056534	56.533745	1	5	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R40_R40_R42_R42
1937	VAP	B	AVENIDA	1	19	0.217234	0.068791	68.790924	1	5	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R40_R40_R42_R42
0		B		1	20	0.345777	0.09457	94.57025	1	4	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R40_R40
0		B		1	20	0.155665	0.051886	51.886287	1	4	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R40_R40
1968	VAP	B	AVENIDA	1	20	0.090219	0.022462	22.461715	1	4	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R40_R40
0		B		1	20	0.166302	0.055434	55.433981	1	4	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R40_R40
0		B		1	20	0.090682	0.030227	30.227451	1	4	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R40_R40
0		B		1	20	0.094019	0.03134	31.339677	1	4	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R40_R40

Figura 6 Tabla de Atributos de ArcMap sobre la red vial de Armenia con la selección de las rutas del SETP

Fuente: Elaboración propia

Después de ingresar las rutas del SETP a los arcos de la red, se verificó la red peatonal con el mapa base de ArcGis y se crearon algunos arcos que actualmente hacen parte de esta, pero que en el plano no se evidenciaban. Lo anterior, teniendo en cuenta que la red de trabajo, por tratarse de transporte público, solo se ingresan atributos relacionados con las rutas del SETP y los recorridos peatonales.

Con el fin de facilitar el ingreso de la información, los cálculos y visualizar de una manera más ordenada los datos, se creó una nueva columna en la tabla de atributos que definía con los números 1 y 0, si algún arco era exclusivamente para peatones o no. En la siguiente Figura se observa la columna seleccionada, con los atributos de la red exclusivamente peatonal.

LONGITUD	SHAPE_LENG	T_P	No_R	RUTAS_2	VEL_OPERAC	VEL_TRANS	Red_peaton
0.032753	32.752614	0	0		4.68	5	1
0.030199	30.198857	0	0		4.68	5	1
0.009642	9.641893	0	0		4.68	5	1
0.113679	113.678832	0	0		4.68	5	1
0.027385	27.385205	0	0		4.68	5	1
0.033767	33.766605	0	0		4.68	5	1
0.011666	11.665765	0	0		4.68	5	1
0.091335	91.335489	0	0		4.68	5	1
0.051711	51.710922	0	0		4.68	5	1
0.044861	44.86056	0	0		4.68	5	1
0.051554	51.554335	0	0		4.68	5	1
0.033665	33.665289	0	0		4.68	5	1
0.031369	31.369155	0	0		4.68	5	1
0.172052	172.051781	0	0		4.68	5	1
0.062801	62.800626	0	0		4.68	5	1
0.079791	79.791314	0	0		4.68	5	1
0.119395	119.395163	0	0		4.68	5	1
0.032621	32.62095	0	0		4.68	5	1

Figura 7 Tabla de Atributos de ArcMap sobre la red vial de Armenia con la selección de la red peatonal

Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Obtención de las velocidades de operación

Para efectos del presente estudio, se requería principalmente obtener las velocidades de operación de las rutas de buses del SETP y un soporte que determinara la velocidad promedio de caminata, con el fin de realizar los cálculos con base solo en la operación del Transporte Público. Teniendo en cuenta lo anterior, los arcos por donde las rutas de transporte transitaban al menos una vez, se ingresaba a la tabla de atributos el valor de la velocidad promedio de operación obtenido y al resto de arcos se les consideraba como

caminata, motivo por el cual se ingresaba la velocidad promedio de caminata que se determinó y se explicará más adelante.

Velocidad de operación de los buses del SETP: Para el cálculo de las velocidades de operación de los buses del SETP se suministró información por parte de la empresa AMABLE, donde se evidencia la velocidad de operación promedio de cada ruta.

Tabla 2 Velocidades de operación de las rutas proyectadas para el SETP de la ciudad de Armenia

RUTA	VELOCIDAD DE OPERACIÓN (Km/Hora)	VELOCIDAD DE OPERACIÓN PROMEDIO (Km/Hora)
1	16	**16.00**
2	22	
3	15	
4	15	
6	15	
8	15	
9	21	
10	15	
16	15	
19	16	
22	14	
23	15	
26	15	
27	15	
28	15	
29	17	
35	15	
36	15	
38	15	
39	15	
40	16	
41	15	
42	25	
43	15	
44	15	
45	15	
46	15	

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la tabla 1, la velocidad de operación promedio con que operarían las rutas proyectadas del SETP para la ciudad de Armenia es de 16 Km/h. Esta velocidad, se ingresa a cada arco que corresponda en la tabla de atributos del ArcGis, siempre y cuando por allí transite por lo menos una ruta de transporte público.

Velocidad de caminata: Para obtener la velocidad promedio de caminata, se consultaron varios artículos que soportados mediante estudios rigurosos de tránsito definen el valor promedio de la velocidad peatonal.

El Manual de Capacidad de Carreteras, define que dentro de las características del peatón, la velocidad es la más importante y además, esta puede ser afectada por factores como la densidad, el sexo, el tamaño del pelotón, edad, etc. No obstante, determina una velocidad promedio de marcha para grupos típicos de peatones de 1,2 m/s, el equivalente a 4,32 Km/h. (Transportation Research Board, 2000) . Así mismo, en el artículo sobre *Flujos Peatonales en Infraestructuras Continuas: Marco conceptual y Modelos Representativos*, Guío hace referencia sobre algunos modelos matemáticos utilizados para el análisis de flujo peatonal en aceras y senderos peatonales, encontrados por Fruin (1971), donde se trabaja con una velocidad de caminata a flujo libre de 1,36 m/s (4,9 km/h) para flujo bidireccional (Guío , 2010) . Finalmente, en el Articulo realizado por (Martín Bermejo, 2007) habla sobre la velocidad de caminata para calles con pendientes entre 0% y 5% de 4,82 km/h, la cual se escoge como la velocidad más adecuada para el estudio realizado en la ciudad de Barcelona – España.

Luego de analizar algunos artículos relacionados con la velocidad de desplazamiento peatonal, se puede concluir que el rango promedio de este tipo de velocidad oscila entre los 4 y 5 km/h. Para el presente caso de estudio, se trabajará con el promedio de las velocidades consultadas:

$$\bar{V}Caminata = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_i}{n}$$

Donde,

$\bar{V}Caminata$= Velocidad promedio de caminata

$\sum_{i=1}^{n} V_i$= Sumatoria desde 1 a n de las velocidades de caminata consultadas

n= Numero de velocidades consultadas

V_1= 4,32 Km/h. (Transportation Research Board, 2000)

V_2= 4,9 km/h. (Guío , 2010)

V_3= 4,82 km/h. (Martín Bermejo, 2007)

$$\bar{V}Caminata = \frac{4{,}32 + 4{,}90 + 4{,}82}{3} = 4{,}68\ km/h$$

Después de determinar las velocidades para las rutas del SETP y peatones, se ingresaron los datos respectivos en cada uno de los arcos correspondientes, como se muestra a continuación:

T_P	No_R	VEL_OPERAC	RUTAS_2
1	11	16	R1_R4_R6_R19_R22_R28_R36_R39_R40_R41_R45
0	0	4.68	
0	0	4.68	
0	0	4.68	
0	0	4.68	
0	0	4.68	
0	0	4.68	
0	0	4.68	
0	0	4.68	
1	1	16	R29_R29
0	0	4.68	
1	1	16	R6_R6
1	2	16	R6_R6_R19_R19
1	2	16	R6_R6_R19_R19
0	0	4.68	
1	12	16	R1_R4_R6_R8_R19_R22_R28_R36_R39_R40_R41_R45
0	0	4.68	
1	4	16	R4_R4_R22_R22_R36_R36_R40_R40

Figura 8 Velocidades de operación ingresadas a la red

Fuente: Elaboración propia

3.2 Procesamiento de redes viales:

Después de agregar los atributos necesarios para el cálculo de la accesibilidad y de haber recalculado las longitudes de los arcos, se debe proyectar la red a coordenadas GCS_WGS_1984, teniendo en cuenta que para los cálculos en ArcGis se trabajó con

coordenadas GCS_MCO. Este procedimiento es necesario, pues los cálculos de accesibilidad se deben realizar en el Software TransCAD y este trabaja en coordenadas geográficas GCS_WGS_1984.

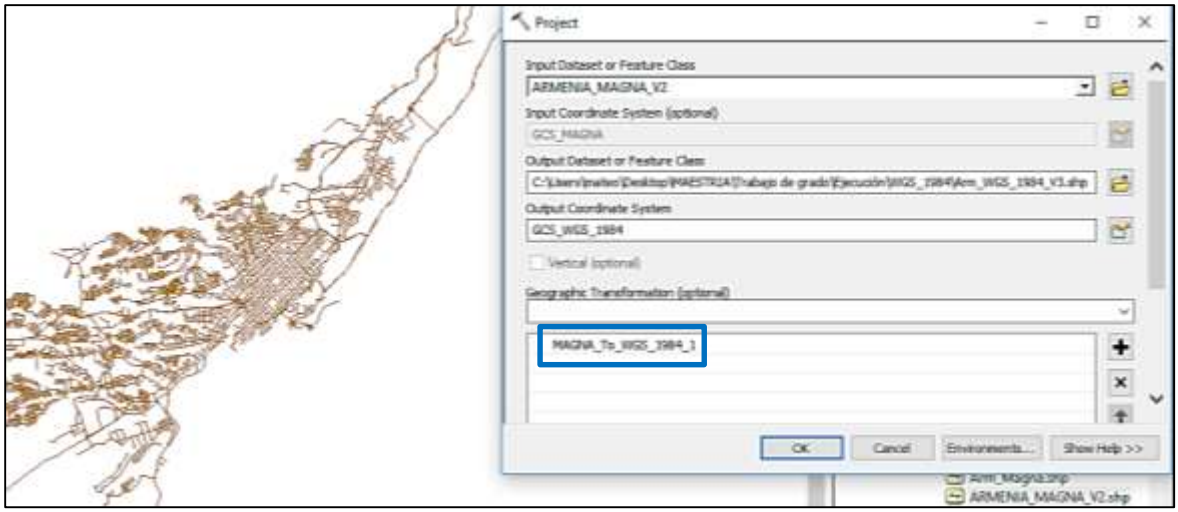

Figura 9 Proyección de coordenadas a WGS1984 en ArcGis de la red vial de Armenia

Fuente: Elaboración propia

3.3 Cálculo de los tiempos medios de viaje:

Después de proyectar la red al sistema de coordenadas geográficas WGS1984, esta se importó al software TransCAD, donde se realizaron los ajustes necesarios de conexiones entre arcos y nodos y se creó la red del transporte público.

Como paso a seguir, se corrió la red en TransCAD buscando el tiempo de viaje desde un nodo i hasta todos los otros nodos de la red, a través del algoritmo de caminos mínimos (Dijkstra, 1959).

Para este caso de estudio, la accesibilidad media global se calcula obteniendo la matriz [nxn] con los tiempos mínimos de viaje desde el nodo i hasta los demás nodos de la red. Posteriormente, para calcular el vector de tiempos mínimos promedio de viaje se realiza la sumatoria de los tiempos de cada nodo i hasta n-1 y se divide entre el número total de nodos menos 1, tal y como se muestra en la ecuación 1.

$$\overline{Tvi} = \frac{\sum_{j=1}^{m} tv_{ij}}{n-1} \qquad i = 1, 2, 3, \ldots n \quad j = 1, 2, 3, \ldots m$$

Ecuación 1 Tiempo de viaje mínimo promedio

Donde:

$\overline{Tvi}$ = Tiempo de viaje mínimo promedio

$\sum_{j=1}^{m} tv_{ij}$ = sumatoria del tiempo de viaje mínimo entre el nodo i y los demás nodos de la red

n = Número total de nodos de la red

$m = n - 1$

Con el cálculo anterior, se obtiene un vector de tiempo de viaje mínimo promedio del orden [nx1], que al agregarle las coordenadas latitud y longitud se convierte en una matriz [nx3], la cual se exportará al ArcGis para obtener las curvas isócronas a través de un análisis geoestadístico.

3.4 Análisis geoestadístico y evaluación de las curvas isócronas de la red del SETP

Con el vector calculado de tiempos promedio de viaje y las respectivas coordenadas, se procede a cargar el archivo en ArcGis, con el fin de obtener la capa de nodos georreferenciada con toda la información de tiempos medios de viaje para cada uno.

Posteriormente, se procede a realizar el análisis geoestadístico con la herramienta Geostatical Analysis de ArcMap, en el que se relacionan los datos geoespaciales de cada matriz con sus respectivos campos de lectura. Luego, con el uso de la herramienta Geostatical Wizard se procede a desarrollar el modelo geoestadístico, que se encargará de realizar la predicción en sitios de la región no muestreados por medio de la técnica Kriging (Giraldo H., 2002). Esta técnica, considera que la distancia entre los puntos muestréales refleja una correlación espacial que permite explicar el comportamiento de una superficie; por lo tanto, a menor distancia mayor la correlación entre variables:

$$Z(S_o) = \sum_{i=1}^{N} \lambda i Z(Si)$$

Donde,

$Z(Si)$= Valor medido en la localización i.

λi= Ponderación para el valor medido en la localización i.

S_o= Ubicación de la predicción.

N= Cantidad de valores medidos.

La representatividad de los datos mediante el método de kriging, incorpora el uso de semivariogramas para la evaluación de la correlación de los datos muestreados como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\gamma(h) = \frac{\sum(Z(x+h) - Z(x))^2}{2n}$$

Donde,

$Z(x)$= Valor de la variable en el sitio x.

$Z(x+h)$= Valor de la variable separado del sitio anterior por una distancia h.

n= Número de parejas que se encuentran separadas por dicha distancia.

Despues de obtener los parámetros de correlación y estimación, esta herramienta ilustra en modo raster, la variación en tiempo de viaje para cada accesibilidad (curvas isócronas) (Montoya G., 2019)

3.5 Análisis de cobertura espacial de las curvas isócronas obtenidas en relación con la variable población por estrato socioeconómico

Con el plano de Armenia qué identifique la distribución de la población por estrato socioeconómico, se intersectan los polígonos con la información obtenida de accesibilidad con el fin de obtener el impacto que genera el SETP en los diferentes estratos y sectores de la ciudad.

Para realizar el intercepto entre los polígonos de accesibilidad y población por estrato socioeconómico, se accede a la herramienta Geoprocessing – intersect de ArcMap. Posteriormente se exportan los datos calculados y se obtiene la capa de nodos con la información cruzada.

Cabe anotar que para efectos de los cálculos de la cobertura espacial en el análisis de accesibilidad, se realizará a través del polígono de comunas y se tomará el estrato socioeconómico predominante de cada una. Por lo anterior, es necesario aclarar que a pesar de que Armenia presenta 6 niveles de estrato socioeconómicos, el estrato No. 6 no figura en ninguna de las comunas, pues los demás estratos predominan sobre éste.

3.6 Análisis geoestadístico y evaluación de las curvas isócronas de la red de transporte privado

Tal y como se desarrolló la metodología para calcular la accesibilidad en transporte público, se proceden a realizar los cálculos de accesibilidad media global para la red del Transporte privado. La información de velocidades de arcos, para este tipo de transporte se extrae del trabajo final de Maestría de (García Velazquez & Escobar García, 2016), el cual tomó velocidades de campo en las vías principales y secundarias de la ciudad de Armenia y estableció para las vías locales una velocidad de 17 km/h.

3.7 Análisis geoestadístico y evaluación de las curvas gradientes de accesibilidad

Con los cálculos de la accesibilidad media global de la red del SETP y la red del transporte privado, se determina el gradiente de ahorro de tiempo promedio de viaje, indicado en porcentaje para cada nodo i.

Para estos cálculos, se deberán tomar los vectores de tiempo medio de viaje de las dos redes en estudio y se llevan al ArcMap a través de la capa de nodos obtenida para cada escenario y nuevamente se usa la herramienta geoprocessing – intersect, y se obtiene una

nueva capa con la información de ambos vectores de tiempos medios de viaje. En la tabla de atributos de la nueva capa obtenida se realiza el cálculo entre el vector de tiempos medios de viaje del SETP y el del transporte privado a través de la siguiente ecuación:

$$\overline{G_{vi}} = \left[\frac{\overline{Tv_{SETP}} - \overline{Tv_{privado}}}{\overline{Tv_{SETP}}}\right] * 100$$

Donde,

$\overline{G_{vi}}$= Gradiente de ahorro entre los tiempos medios de viaje del SETP y transporte privado

$\overline{Tv_{SETP}}$= Vector de tiempo medio de viaje de la red del SETP

$\overline{Tv_{privado}}$= Vector de tiempo medio de viaje de la red de transporte privado

Con este cálculo se podrán analizar los beneficios o no, en términos de tiempos de viaje al usar la red del SETP en comparación con la del transporte privado.

3.8 Análisis de cobertura espacial de las curvas gradientes de tiempo medio de viaje en relación con la variable población por estrato socioeconómico

Con el cálculo de los porcentajes de disminución o aumento en los tiempos medios de viaje que ofrece el SETP, obtenidos con las curvas gradientes, se determina al igual que en el numeral 3.5 la cobertura espacial de estas curvas, con relación a las variables población y estrato socioeconómico, con el fin de determinar qué zonas de estratos se están beneficiando o se están perjudicando al usar el SETP en comparación con el uso del transporte privado.

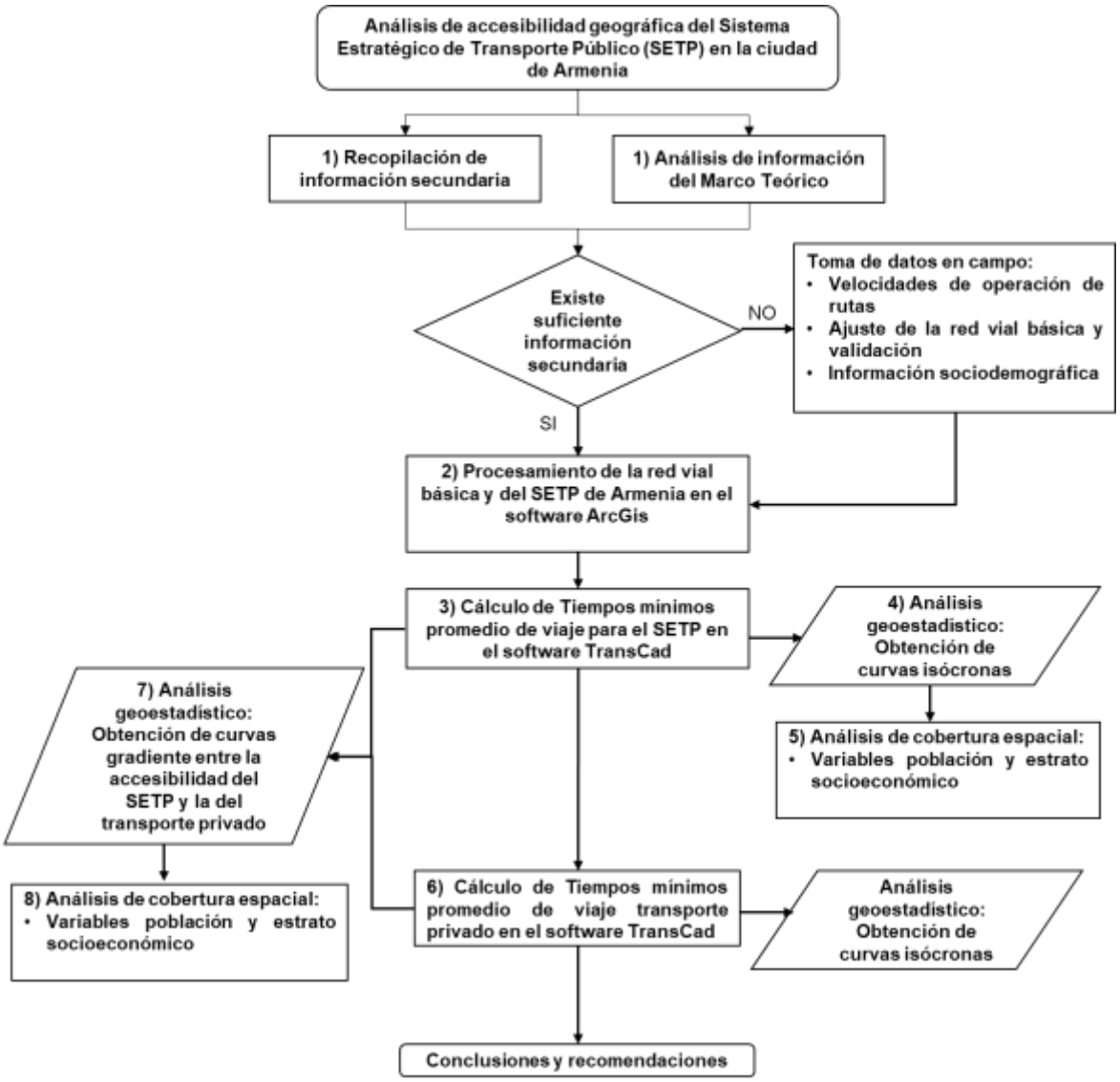

Figura 10 Metodología de investigación

Fuente: Elaboración propia

4. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del cálculo de accesibilidad media global para la red del SETP y la red del Transporte Privado de la Ciudad de Armenia, así como la comparación entre estas dos redes, incluyendo las variables de población y estrato socio económico

4.1 Análisis geoestadístico y evaluación de las curvas isócronas de la red del SETP

A continuación se presentan los resultados obtenidos de accesibilidad media global del SETP para la ciudad de Armenia a través de un mapa de curvas isócronas:

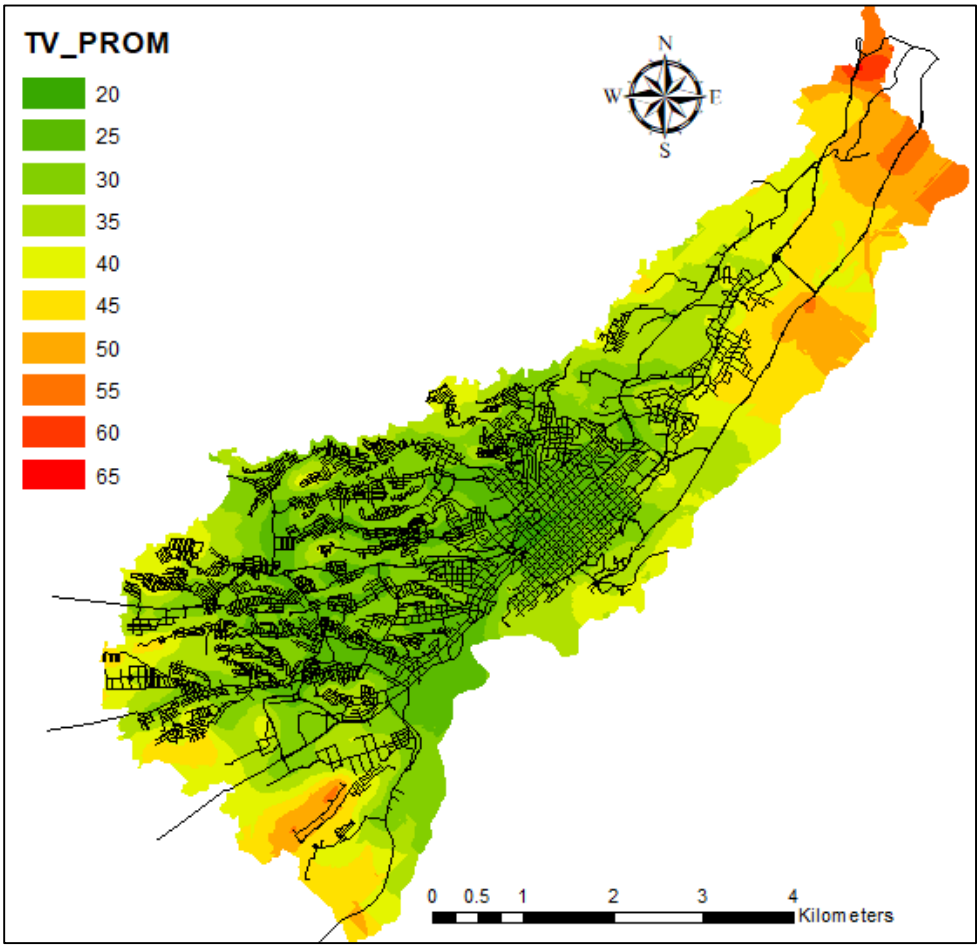

Figura 11 Curvas isócronas de la Accesibilidad Media Global de la red proyectada del SETP para la ciudad de Armenia

Fuente: Elaboración Propia

En consideración con la Figura 11, se observa mediante el mapa de curvas isócronas que la Accesibilidad Media Global de las rutas proyectadas para la red del SETP en la ciudad de Armenia tiene una cobertura de tiempos medios de viaje entre los 20 y 65 minutos. Cabe resaltar, que dentro del alcance de los cálculos de accesibilidad para el SETP se incluyeron solo las velocidades promedio de la red de transporte público, que para este caso se limita a las rutas de buses y caminata.

Así mismo, se puede inferir que la zona norte de la ciudad presenta una baja accesibilidad con tiempos promedio de viaje por encima de los 40 minutos. Lo anterior, teniendo en cuenta que las conexiones en infraestructura vial para el transporte público es escasa y además, especialmente en la Avenida Centenario en el sector del Sena Agropecuario, solo se tiene proyectado el paso de una ruta (ruta 26). Un caso similar se presenta en un sector de la zona sur, por las vías que de Armenia Conducen al Municipio de La Tebaida y al corregimiento el Caimo; pues al presentar una sola ruta de transporte del SETP (9 y 2 respectivamente), reflejan una accesibilidad baja en sus alrededores.

Por el contrario, la zona que presenta mejor accesibilidad con tiempos de viaje entre 20 y 35 minutos es el centro de la ciudad, por las carreras 18 y 19, resaltando que por allí confluyen 22 rutas diferentes y posen la infraestructura mejor adaptada para los buses que operan el SETP, pues además de que estas vías son Arteria Principal y cuentan con un perfil vial amplio, se tiene destinado un tramo de carril exclusivo para los buses del Sistema.

En suma a lo anterior, se realizó una evaluación de cobertura de área de la ciudad por parte de las curvas isócronas. En la tabla 3 se muestra el área de cobertura acumulada por cada valor de tiempo de viaje de las curvas isócronas:

Tabla 3 Porcentaje de cobertura de área de las curvas isócronas para la red del SETP

CURVA ISÓCRONA	%ACUM_ÁREA_CUBIERTA
20	0.51%
25	17.46%
30	43.94%
35	65.04%
40	80.06%
45	91.45%
50	97.65%
55	99.66%
60	99.99%
65	100.00%

Fuente: Elaboración Propia

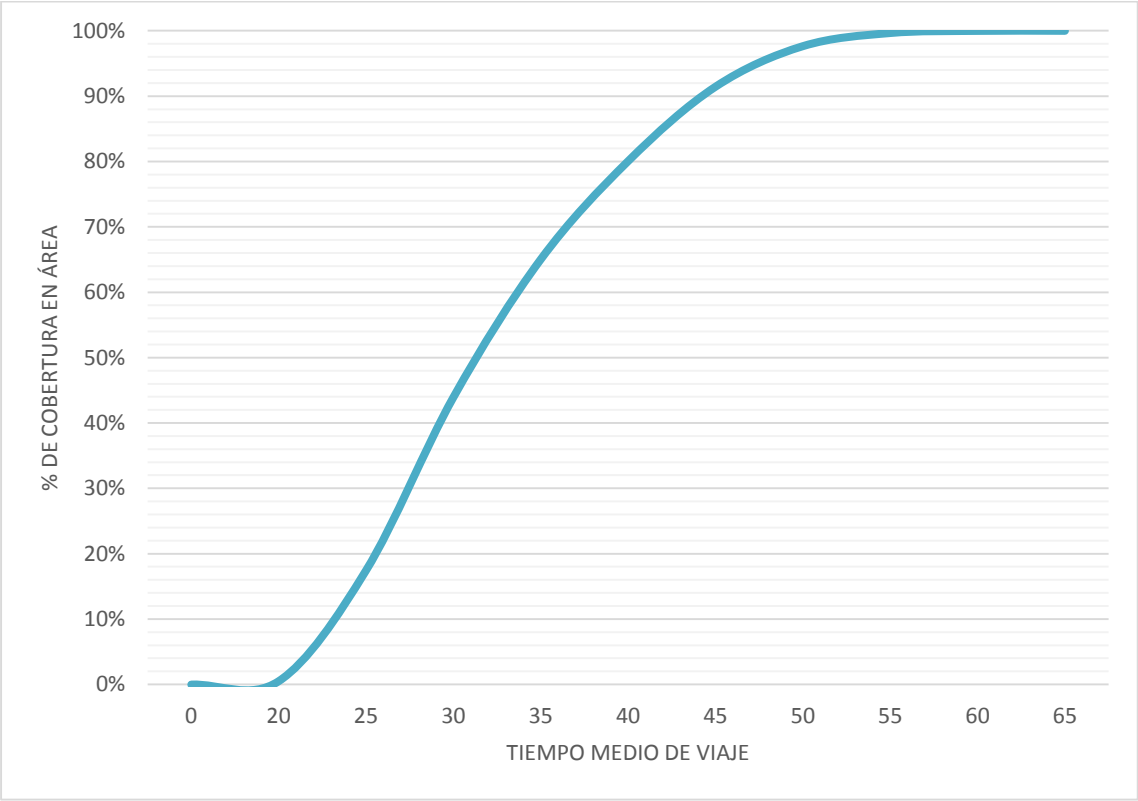

Figura 12 Ojiva acumulada de cobertura de área de la red del SETP

Fuente: Elaboración Propia

Como se especifica tanto en la tabla como en el gráfico anterior, tan solo el 0,51 % del área de la ciudad presenta tiempos medios de viaje de 20 minutos usando el SETP. Así mismo se puede inferir que la isócrona de 40 minutos cubre el 80% del área total de Armenia.

De acuerdo con esta información, se puede destacar que las rutas proyectadas para el SETP de la ciudad de Armenia, presentan una accesibilidad media global relativamente buena, teniendo en cuenta que a pesar de ser una ciudad pequeña, el parque automotor que circula por la Ciudad es muy alto, lo que ocasiona una disminución en las velocidades de operación. Sin embargo se deberá revisar y analizar en los siguientes capítulos la comparación realizada con la red vial básica, pero con transporte privado, con el fin de determinar la diferencia en los tiempos medios de viaje que se puede presentar entre estos dos modos de transporte.

Como conclusión, se observa de manera clara que Armenia ofrece una infraestructura vial óptima para el SETP, especialmente en la zona céntrica, en donde cuenta con varias vías arterias principales que se conectan con el mayor número de vías secundarias y colectoras y que permiten el ingreso y salida del mayor número de rutas en esta zona, generando de esta forma una accesibilidad mucho mayor que la presentada tanto en la periferia como en la parte norte de Armenia, en donde no se cuenta con una buena oferta de infraestructura vial que permitan las conexiones entre las vías arterias principales y secundarias.

Finalmente, es necesario aclarar que una de las limitantes para realizar un análisis más profundo de la accesibilidad del SETP, está relacionada con el estudio sobre la cobertura de los paraderos de buses, y la incidencia que estos tienen en los tiempos de caminata de los usuarios que desean abordar el SETP, el cual se deberá estudiar con mayor profundidad en otra investigación (Montoya G., 2019). Adicional, es necesario determinar los tiempos que gastan en promedio los usuarios en estos paraderos antes de abordar el transporte público, lo que sería otro tipo de perspectiva para medir la accesibilidad, basada más en el usuario que en la infraestructura, siendo esta última la base de la presente investigación.

4.2 Análisis de cobertura espacial de las curvas isócronas obtenidas en relación con la variable población por estrato socioeconómico

Con el fin de realizar un análisis más amplio que identifique algunas variables espaciales y socioeconómicas de Armenia, se realizó un cruce en ArcGIS, entre los resultados obtenidos con la accesibilidad media global, estudiada en el subcapítulo anterior, y el polígono de comunas, población y estrato socioeconómico. Como resultado se obtiene la cobertura de las curvas isócronas, de tiempos medios de viaje para el transporte público, en relación con la población y el estrato socioeconómico, además de las 10 comunas con las que cuenta en la actualidad la ciudad.

En la siguiente figura se muestra la cobertura de curvas isócronas sobre la población de Armenia, indicador que unido con la información de las comunas y estrato socioeconómico, aporta a la identificación de los lugares de la ciudad con mayor o menor accesibilidad y el % de la población que representan, así como los estratos más o menos beneficiados.

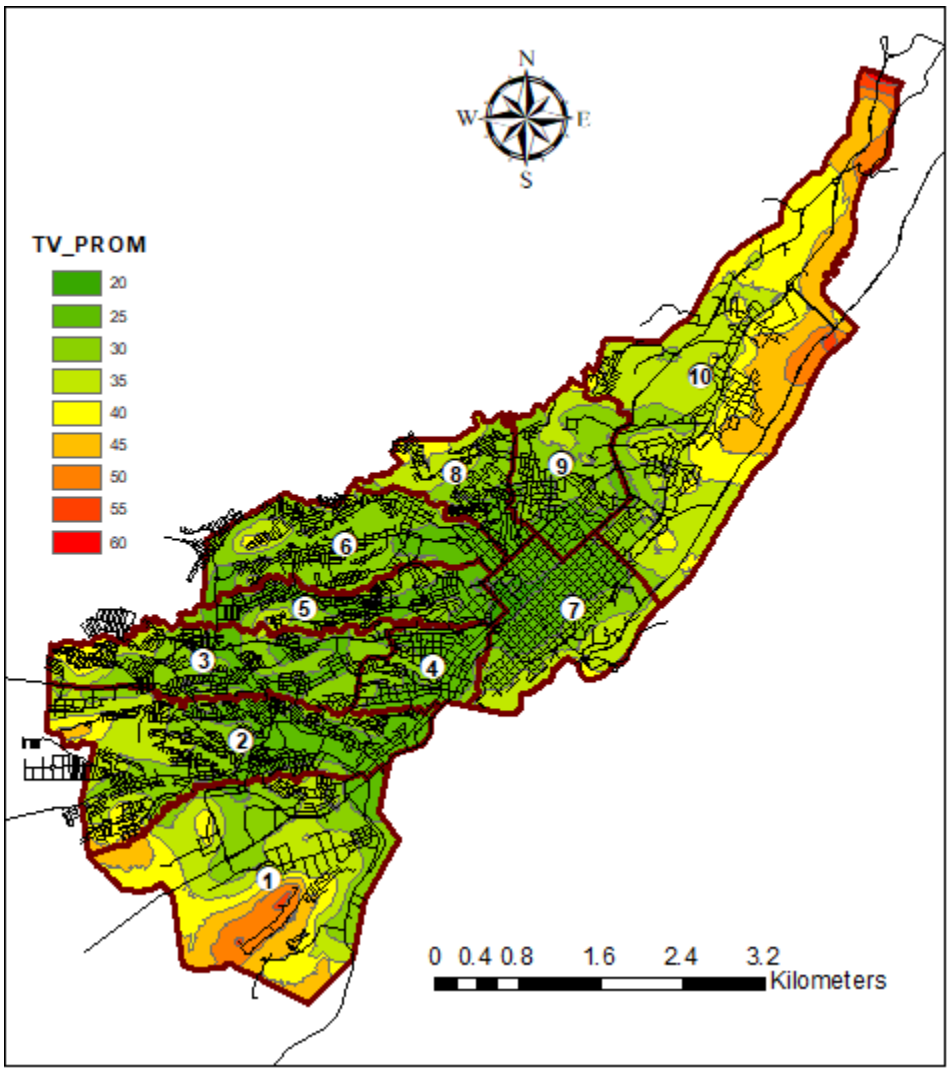

Figura 13 Cobertura de curvas isócronas de la Accesibilidad Media Global de la red proyectada del SETP en las comunas de Armenia

Fuente: Elaboración Propia

Como se visualiza en la Figura 13, las comunas que presentan una baja accesibilidad son la No. 1 y No. 10, las cuales se ubican en los extremos sur y norte de la ciudad respectivamente. En la comuna No. 1 predomina el estrato 1, que es el más bajo; por el contrario la comuna 10 registra como estrato predominante el 5 el cual es el segundo más alto.

En la siguiente tabla y gráfica se muestra el porcentaje acumulado de la población cubierta por cada una de las curvas isócronas:

Tabla 4 Porcentaje de la población cubierta por las curvas isócronas

CURVA ISÓCRONAS	%ACUM_POBLACIÓN_CUBIERTA
20	0.53%
25	24.52%
30	61.47%
35	82.18%
40	91.79%
45	97.80%
50	99.67%
55	99.93%
60	100.00%

Fuente: Elaboración Propia

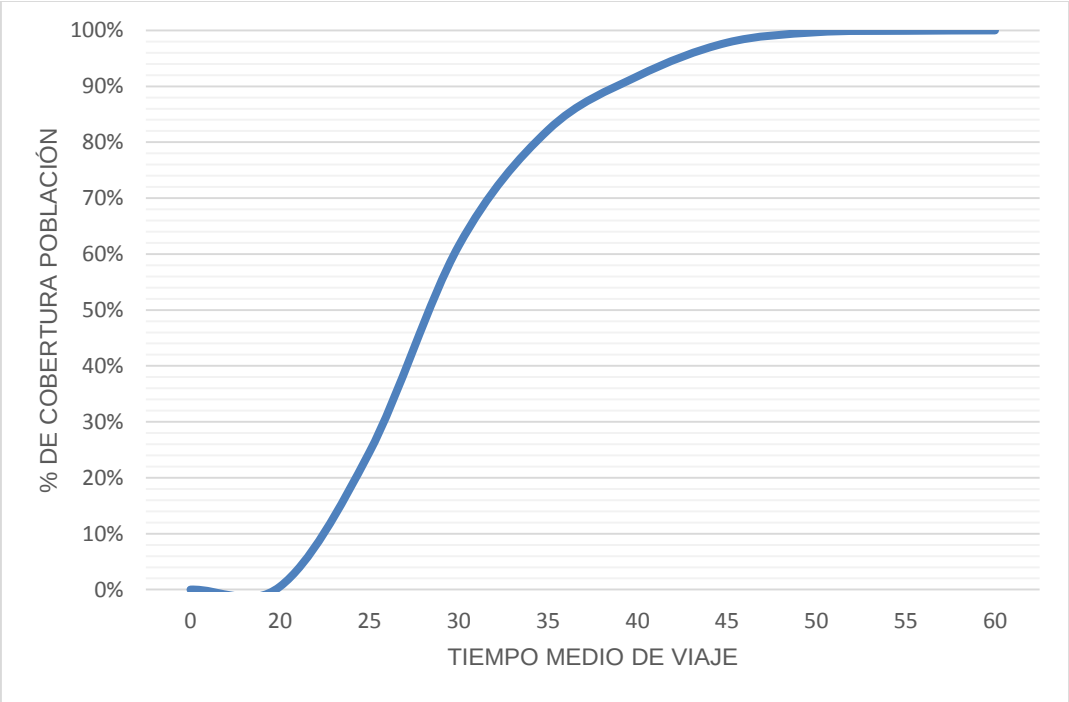

Figura 14 Ojiva acumulada de cobertura de la población de la red del SETP

Fuente: Elaboración Propia

Después de realizar el cálculo de cobertura espacial de las curvas isócronas obtenidas en relación con la variable población, se puede deducir que tan solo el 0,53% de la población presenta tiempo promedio de viaje por debajo de los 20 minutos. Así mismo, se puede inferir que más del 90% de la población está cubierta por la curva de 40 minutos.

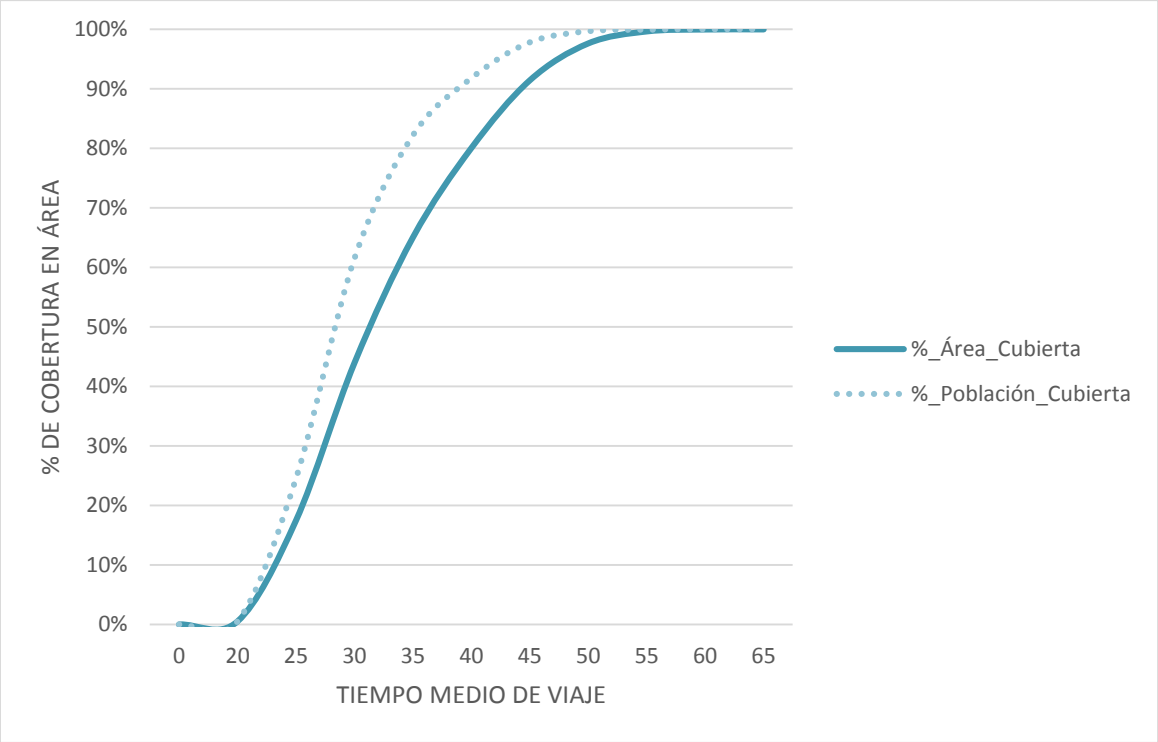

Figura 15 Ojiva acumulada de cobertura de la población de la red del SETP

Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, en la Figura 15 se aprecia la comparación de la cobertura de área y población en cuanto a los tiempos medios de viaje calculados. Según las curvas obtenidas, se evidencia que hay una alta densidad de población cubierta por las curvas de tiempo medio de viaje entre los 25 y 45 minutos, es decir que por ejemplo la curva de tiempo medio de viaje de 30 minutos que cubre aproximadamente el 60 % de la población, en área cubre solo el 40%. Este resultado es un buen indicador, teniendo en cuenta que puede ser más beneficioso que una curva determinada de tiempo medio de viaje cubra mayor población en menos área, siempre y cuando esta curva represente un tiempo medio de viaje bajo.

Con respecto al análisis de la cobertura de población por estrato socioeconómico, en la Figura 16 se evidencian las ojivas con el porcentaje de población cubierta por las curvas isócronas para cada estrato. Cabe aclarar que la información de los estratos fue tomada de los estratos predominantes en las 10 comunas, por tal razón no figura el estrato 6,

teniendo en cuenta que no es predominante en ninguna de las comunas y además solo representa el 1,33 % aproximadamente del total de la población.

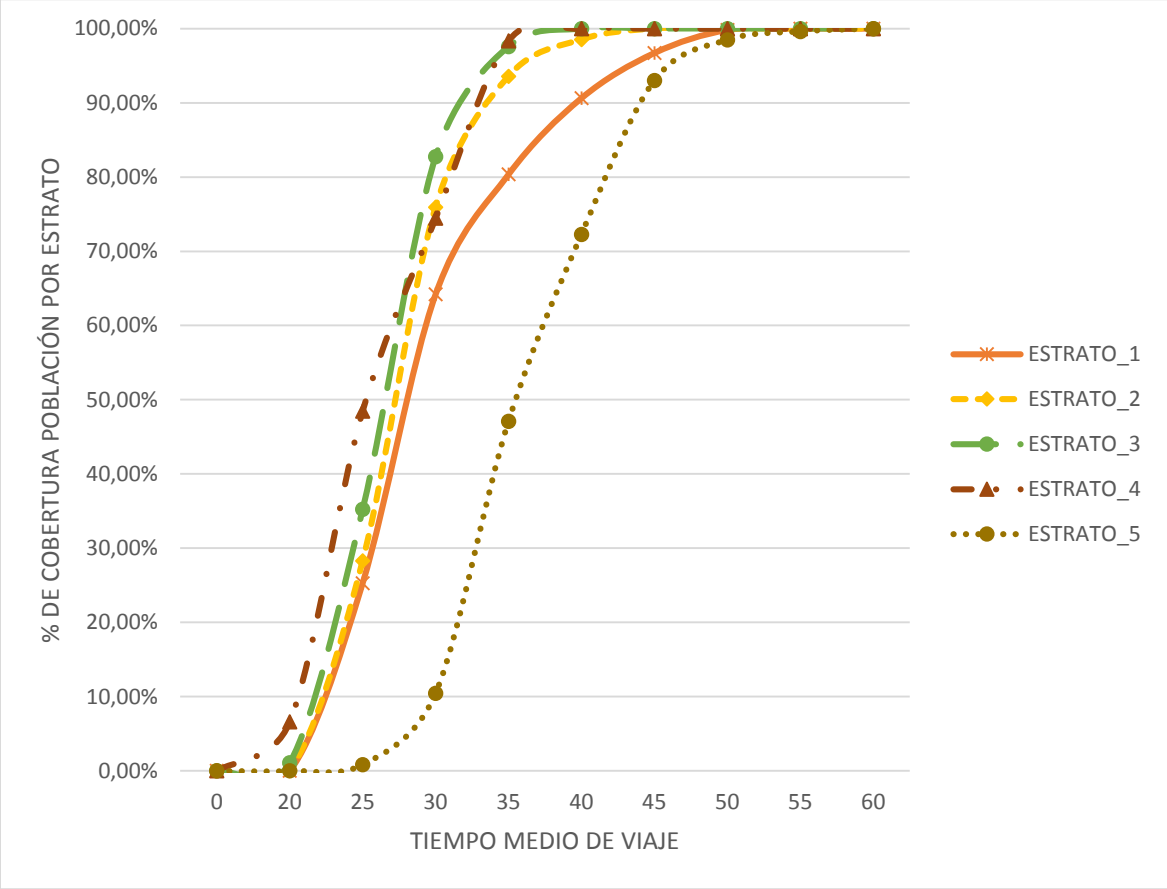

Figura 16 Ojiva acumulada de cobertura de la población por estrato socioeconómico de la red del SETP

Fuente: Elaboración Propia

Según el gráfico anterior, se observa que el estrato 5 presenta la accesibilidad más baja de la población, teniendo en cuenta que alrededor del 90% de la misma está cubierta por la curva de 45 min. Lo anterior, puede impactar de manera considerable en la toma de decisión del modo de transporte a usar por parte de este tipo de población, pues además de la baja accesibilidad que se observa, debido a su mayor poder adquisitivo, la tenencia de vehículo particular tiende a ser mucho mayor. Esto generaría que la congestión vehicular aumente y a su vez impacte en las velocidades de operación de las rutas del SETP.

Como se puede ver en la tabla 2, la comuna 10 es la que cuenta con más predios estrato 5 y según el mapa de isócronas por comunas (Figura 12), se observa poca infraestructura vial y menores conexiones entre las vías arterias principales y secundarias, lo que se ve reflejado en la baja accesibilidad que presenta con relación a las demás comunas y estratos.

Por el contrario la población de estrato 4 presenta la mejor accesibilidad usando el SETP, teniendo en cuenta que casi el 100% de la población está cubierta por la curva de 35 minutos de tiempo de viaje promedio. Este tipo de población se concentra principalmente en la zona centro de la ciudad en la comuna 7, lo que se ve reflejado en la gran oferta de infraestructura vial que posee esta zona, además de las 22 rutas diferentes de buses del SETP que por allí transitan.

Por otro lado, la población de estrato 1 refleja al igual que el estrato 5 una baja accesibilidad, ya que la curva de tiempo promedio de viaje de 40 minutos cubre el 90% de la población. Teniendo en cuenta que este tipo de población es la más vulnerable a nivel económico y que además representan cerca de 20% de la población total, se deben revisar tanto la infraestructura vial ofertada, como las rutas del SETP proyectadas para cubrir las zonas de estos estratos. Es necesario resaltar, que este tipo de población, por su condición económica y social, son los más afectados con la prestación del servicio del transporte público. Además, teniendo en cuenta las cifras del crecimiento del parque automotor, especialmente el de motos que ascendía en el 2014 a 268% (García Velazquez & Escobar García, 2016), se debe garantizar con mayor razón un servicio público de calidad y asequible a toda la población con el fin de desincentivar el uso del vehículo privado, que para el caso de los estratos inferiores se ve muy marcado por la facilidad de adquirir la motocicleta, que además de ser un vehículo altamente contaminante, se ve involucrado en la gran mayoría de accidentes de tránsito.

4.3 Accesibilidad Media Global en la red de transporte privado de Armenia

Luego de ejecutar los cálculos de accesibilidad para la red del SETP, con el fin de realizar una comparación entre dos redes de transporte, se procedió con los cálculos de la red de transporte privado. Para lo anterior, se tomó la información base de velocidades de operación calculadas en el trabajo de grado denominado “Análisis comparativo de accesibilidad territorial por nuevas intervenciones viales. Caso aplicado de la ciudad de Armenia”(García & Escobar, 2016) y se procedieron a ejecutar los cálculos de accesibilidad, de igual forma que con la red del SETP.

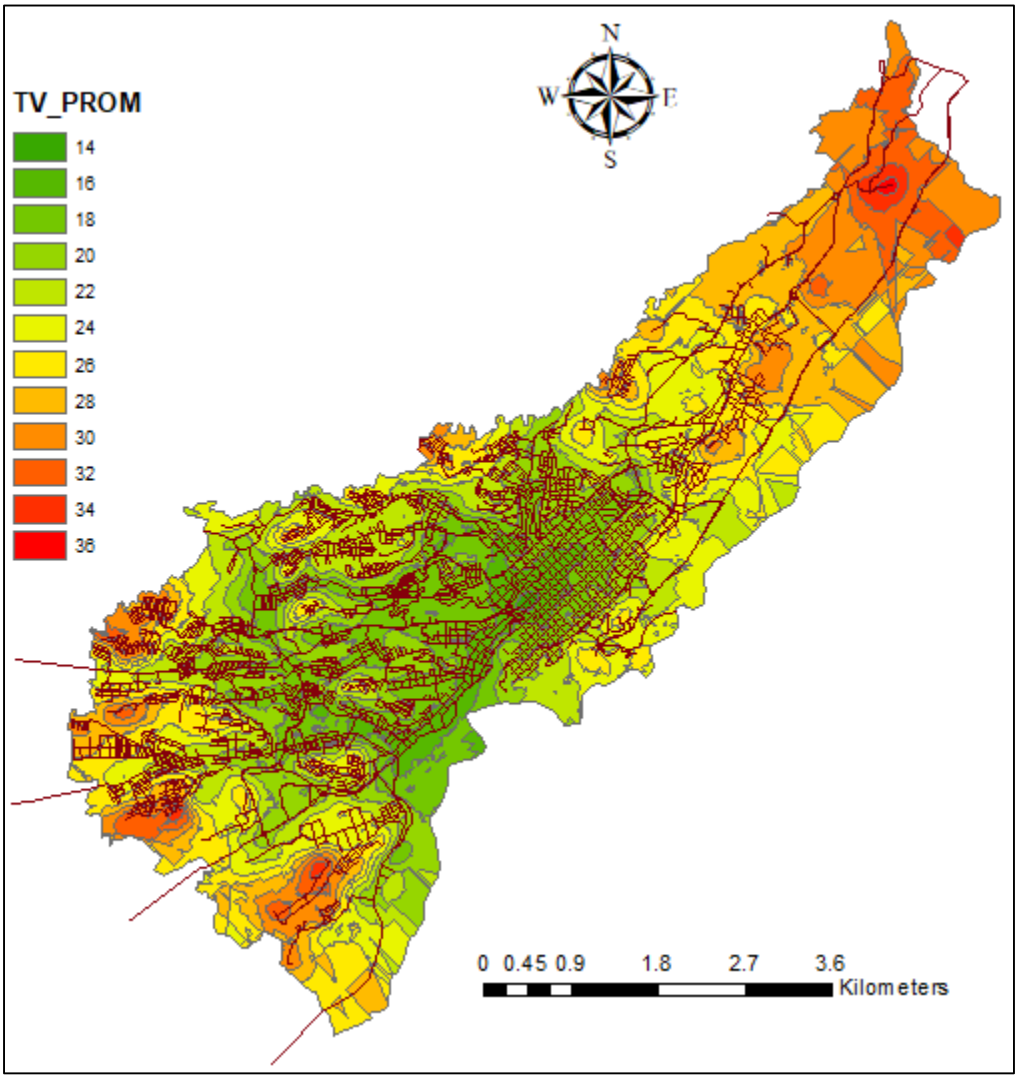

Figura 17 Curvas isócronas de la Accesibilidad Media Global de la red de transporte privado para la ciudad de Armenia

Fuente: Elaboración Propia

Conforme a la Figura 17, se deduce que las curvas isócronas que cubren los tiempos medios de viaje del transporte privado para la ciudad de Armenia van desde los 14 minutos hasta los 36 minutos. Al igual que en la red del transporte público, se evidencian los tiempos de viaje más altos en la periferia de la ciudad, especialmente en los extremos norte (salida hacia el municipio de Circasia) y sur (salida hacia los municipios de Montenegro y La Tebaida), con tiempos de viaje promedio superiores a los 24 minutos. Por el contrario, en la zona centro de la ciudad, se observan los menores tiempos, los cuales van desde los 14 minutos hasta los 22 minutos.

Complementando lo anterior, en la tabla 5 se observa que, tan solo el 0,10 % del área urbana de Armenia es cubierta por la curva de 14 minutos y el 95% del área de la ciudad se encuentra cubierta por la curva de 30 minutos de tiempo promedio de viaje.

Tabla 5 Porcentaje de cobertura de área de las curvas isócronas para la red de transporte privado

CURVA ISÓCRONA	%ACUM_ÁREA_CUBIERTA
14	0.10%
16	4.08%
18	18.02%
20	31.29%
22	45.90%
24	61.46%
26	74.02%
28	85.60%
30	95.04%
32	99.20%
34	99.91%
36	100.00%

Fuente: Elaboración Propia

Así mismo, haciendo una comparación entre la red del SETP (Figura 12) y la red del transporte privado (Figura 18) , se puede evidenciar que en la red del SETP el 80% del área urbana es cubierta por la curva isócrona de 40 minutos, mientras que para este mismo porcentaje de área, en la red de transporte privado la cubre la curva isócrona de tiempo

medio de viaje de 27 minutos, presentándose una diferencia representativa de 13 minutos entre un modo de transporte y el otro para este porcentaje de cobertura de área.

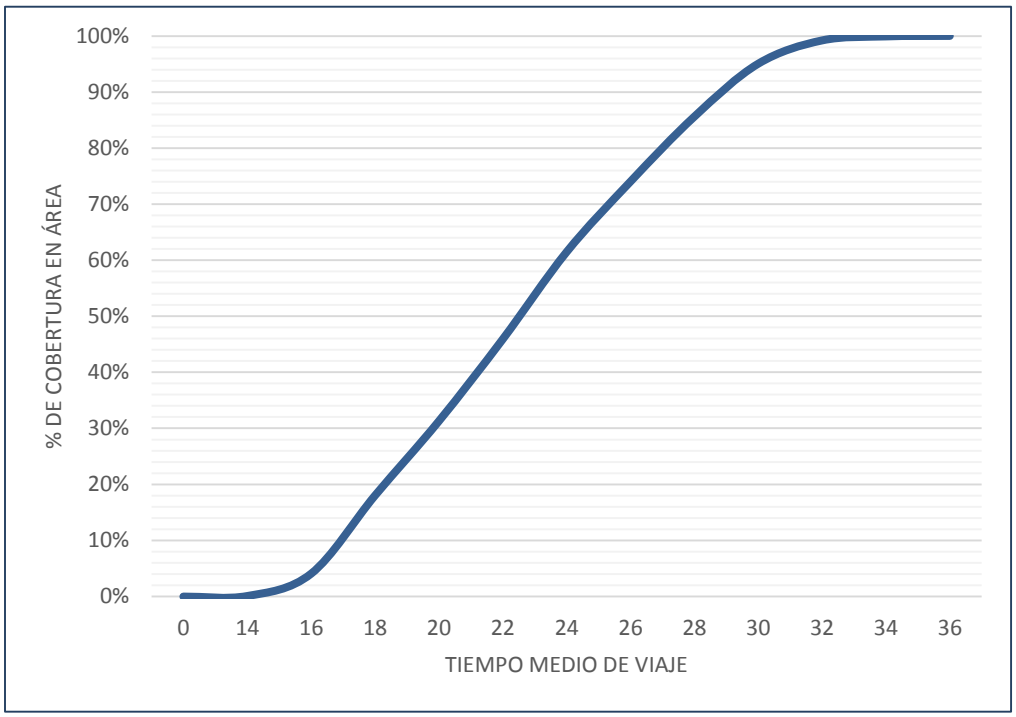

Figura 18 Ojiva acumulada de cobertura de área de la red de Transporte privado para la ciudad de Armenia

Fuente: Elaboración Propia

4.4 Gradiente de ahorro entre la red del SETP y la red de Transporte Privado

Con el fin de analizar de manera más precisa las diferencias que tienen las dos redes de transporte, se procede a realizar el cálculo de gradiente de ahorro entre la red del SETP y la red del transporte privado. En la Figura 19 se pueden evidenciar las curvas isócronas con él % de ahorro obtenido al pasar de usar la red del SETP a la red de transporte privado.

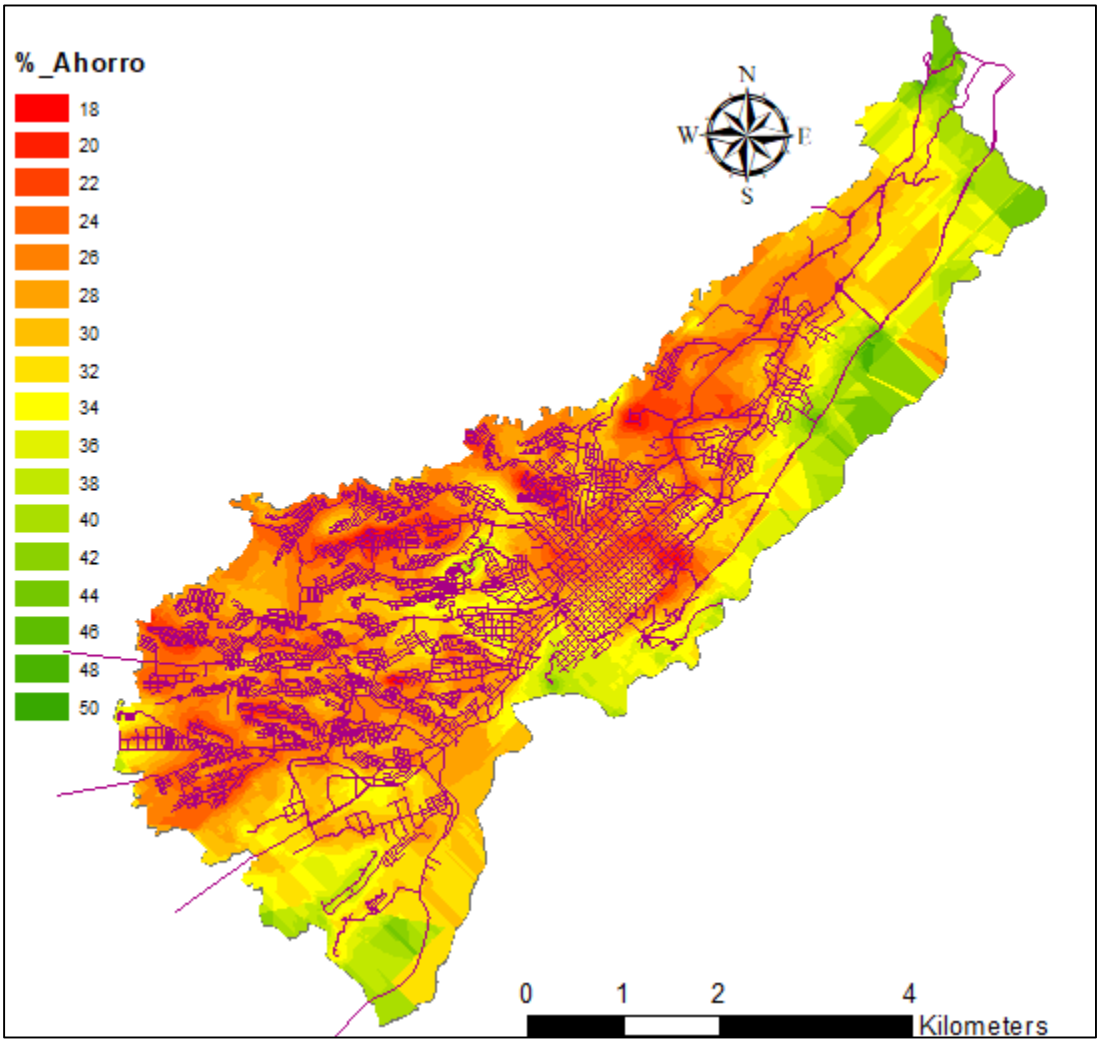

Figura 19 Gradiente de ahorro entre la red del SETP vs la red del transporte privado

Fuente: Elaboración propia

De la anterior Figura se difiere que el porcentaje de ahorro del tiempo promedio de viaje con respecto al cambio de uso de la red del SETP a la red del transporte privado es representativo, pues en las zonas donde se presenta menos ahorro se evidencian cambios del 18 % en adelante y en las zonas de mayor ahorro se puede evidenciar una reducción de hasta la mitad del tiempo promedio de viaje entre el cambio de una red de transporte a la otra.

Así mismo, cabe anotar que en el sector donde se presenta menor porcentaje de ahorro es en la zona céntrica de la ciudad, teniendo en cuenta la oferta de rutas que proyecta el SETP para esta área. Por otro lado, se puede comprobar que las zonas que presentan mayor ahorro son los extremos geográficos de la ciudad, que además se ven representados en los extremos sociales, ya que en la parte norte, se ubican los estratos más altos y en la parte sur los estratos más bajos. Esto puede indicar un problema para la movilidad en la ciudad, pues por un lado, en los estratos más bajos (1 y 2), al verse reflejado un porcentaje elevado de ahorro entre el SETP y el transporte privado, pueden tener una tendencia mayor al uso del vehículo privado, que para este caso sería la motocicleta, en su gran mayoría, destacando la facilidad de adquisición de este vehículo y el ahorro económico del mismo. Cabe aclarar, que si bien no se tuvo en cuenta en el análisis de la red de transporte privado, las velocidades de la motocicleta, con los resultados obtenidos es evidente deducir el ahorro mucho mayor que se tendría entre el cambio del SETP al vehículo privado motocicleta. Considerando también lo expresado anteriormente, se puede diferir que estas diferencias tan altas en los tiempos de viaje para estos sectores de la ciudad, podrían incrementar el uso del transporte clandestino como lo es el llamado ‘Moto-ratón’.

A su vez, en el otro extremo tanto geográfico como social de la ciudad (estratos 5 y 6), al igual que en los estratos más bajos, se evidencia el ahorro más alto entre el cambio del SETP al transporte privado, lo que significa que, teniendo en cuenta el alto poder adquisitivo de la mayoría de la población de este sector, tiende a incrementar el uso del vehículo privado, que para este caso en gran parte, sería el carro. Es decir, que ocn esta situación para la zona mencionada, se vería reflejado el aumento del parque automotor de la ciudad, especialmente para la red del transporte privado, que en últimas llevaría al aumento en los tiempos de viaje de toda la red de transporte que cubre el sector urbano de la ciudad

4.5 Análisis de cobertura espacial de las curvas gradientes de tiempo medio de viaje en relación con la variable población por estrato socioeconómico

Para revisar la cobertura espacial de las curvas gradientes con relación al % de ahorro de los tiempos medios de viaje entre el SETP y el transporte privado, calculadas en el subcapítulo anterior, se evaluó a través del polígono de comunas el cual contiene la información de la población y de los estratos socioeconómicos en todo el perímetro urbano de la ciudad de Armenia.

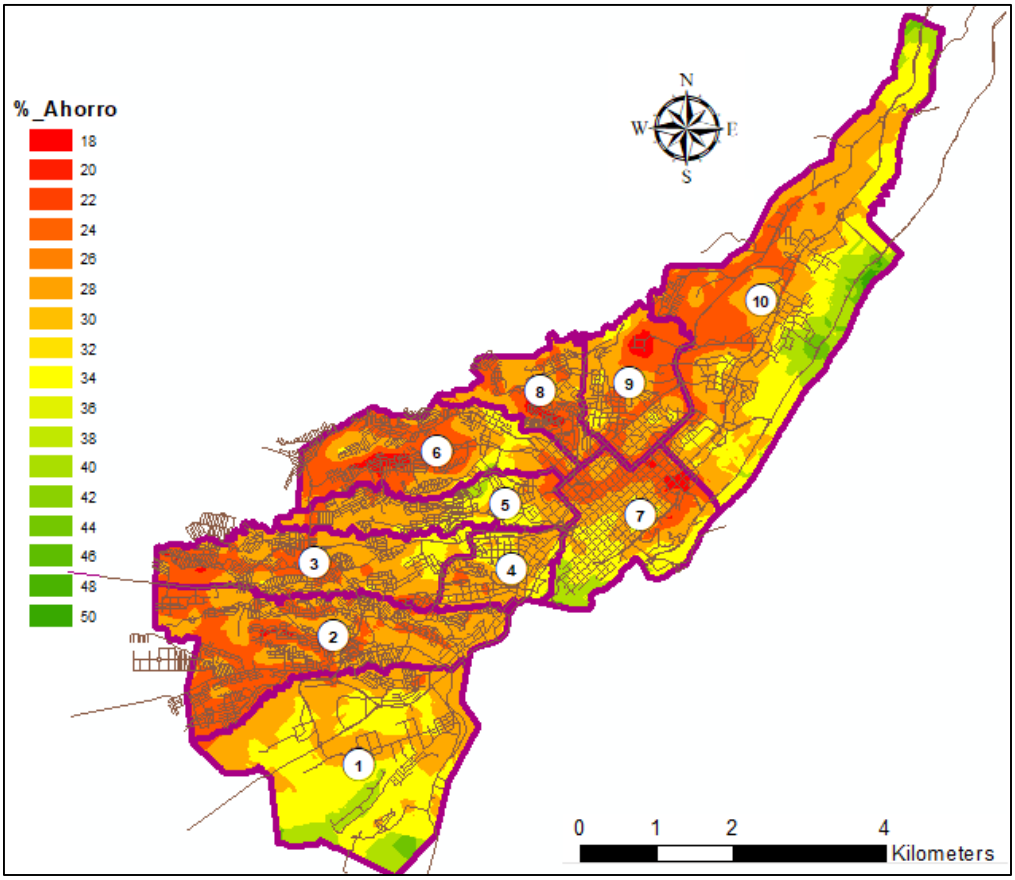

Figura 20 Cobertura de curvas gradiente con él % de ahorro en tiempos de viaje entre el SETP y el Transporte Privado.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 20 se puede observar la cobertura espacial de las curvas gradientes de tiempos medios de viaje para las 10 comunas de la ciudad de Armenia, que a su vez se encuentran categorizadas por población y estrato socioeconómico.

Así mismo, para las comunas 2, 3, 6, 8, 9 ubicadas en el sector occidental de la ciudad y cuyos estratos predominantes son del 1 al 3, el % de ahorro es bajo con relación al cambio de usar la red proyectada del SETP a la red de Transporte Privado. Por el contrario, se evidencia que en el sector Nor-Oriental de la ciudad, cuyos estratos predominantes son 5 y 6 presentan un ahorro considerable al cambiar del SETP al transporte privado, lo que se vería reflejado en un desincentivo aún mayor para estos estratos altos con relación al cambio del uso del vehículo privado por el uso del transporte público.

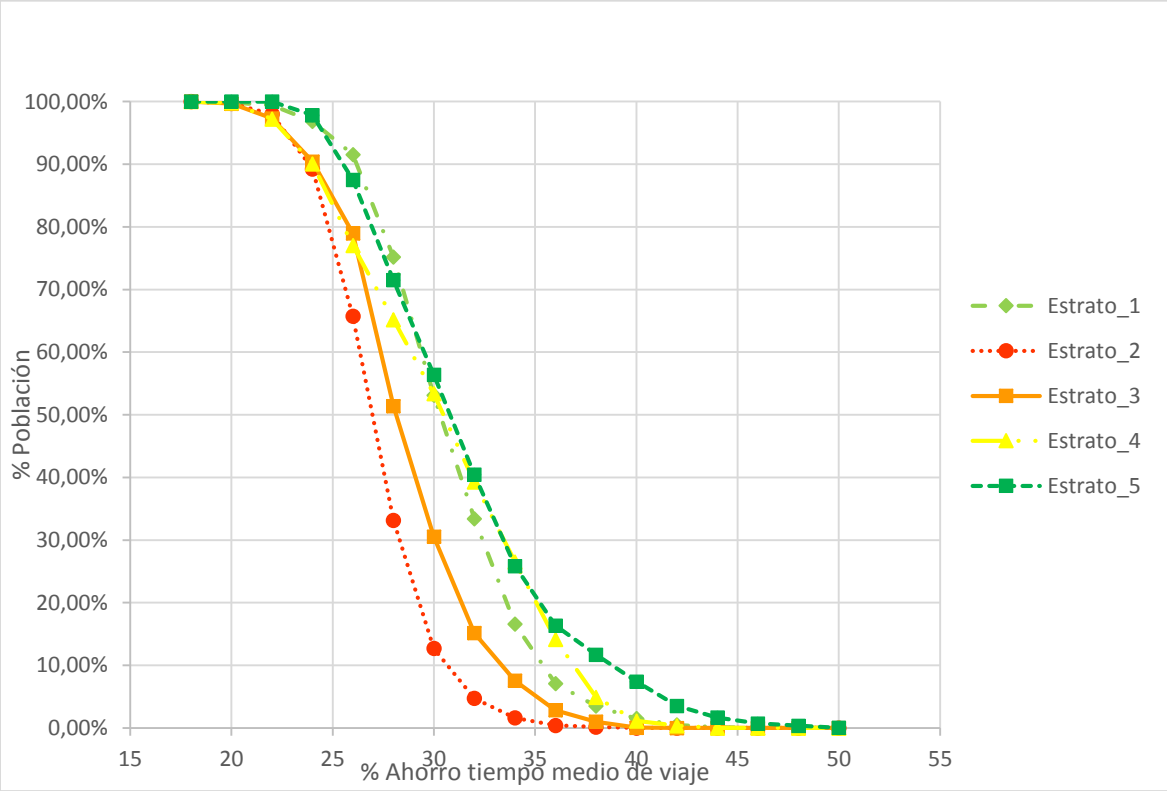

Figura 21 Cobertura de población por estrato socioeconómico del % de ahorro de tiempo promedio de viaje entre el SETP y Transporte Privado

Fuente: Elaboración propia

En relación con la cobertura espacial de las curvas gradientes de tiempo medio de viaje entre el cambio del SETP al Transporte privado, la Figura 21 muestra que para el estrato 1 hasta un 50% de esta población presentaría un ahorro en el tiempo promedio de viaje de hasta el 30%. Por otro lado, para el estrato 5 se puede inferir que toda la población

presentaría un % de ahorro de hasta el 22% lo que influiría directamente en la decisión de una persona que se encuentra ubicada en este estrato para preferir usar el transporte privado por encima del transporte público.

Comparación entre el SETP y el Transporte Privado

En este capítulo se realizó la división entre los tiempos de viaje obtenidos de la red del SETP y la red del Transporte Privado, con el fin de obtener el número de veces que supera o no, el cambiar de la red de transporte público, para este caso el SETP, a la red de transporte privado. Así mismo, se relacionaron estos datos obtenidos con la población de la ciudad, identificando el % de cobertura de población de los diferentes resultados calculados, tal y como se muestra en la Tabla 6 y Figura 22.

Tabla 6 Cobertura de población en relación con la división del SETP/Transporte Privado

No. Veces mayor TVprom	%_Acum_Población
1-1.2	100.00%
1.2-1.4	99.99%
1.4-1.6	32.58%
1.6-1.8	2.89%
1.8-2.0	0.24%
2.0-2.2	0.00%

Fuente: Elaboración propia

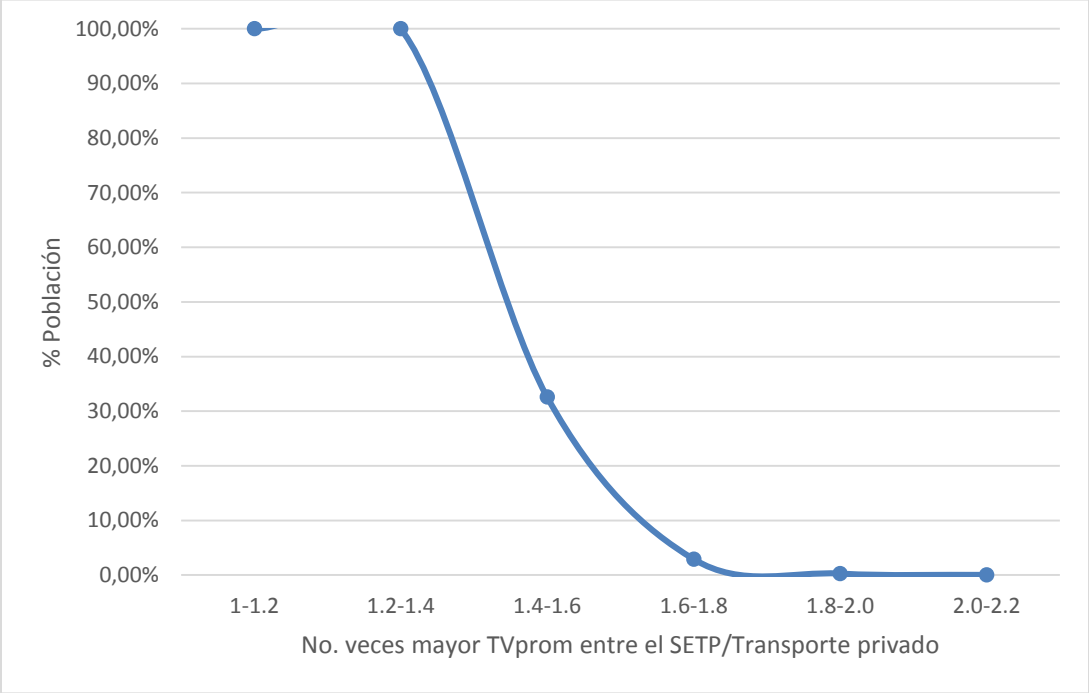

Figura 22 Cobertura de población en relación con la división del SETP/Transporte Privado

Fuente: Elaboración propia

Según los resultados anteriores, se puede inferir que toda la población de Armenia presenta un incremento en sus tiempos medios de viaje hasta en un 20%, al pasar de la red del Transporte Privado a la red del SETP.

Si se analizan los dos tiempos extremos calculados en la Accesibilidad Media Global para la red de Transporte Privado de la Ciudad de Armenia, significaría que se pasaría de 14 minutos como tiempo más bajo a 17 minutos; y de 36 minutos como el tiempo más alto, pasaría a 43 minutos, obteniendo una diferencia que oscila entre los 3 y 7 minutos de más, usando el SETP. Lo anterior, indica una probabilidad alta en la preferencia del uso de transporte privado sobre el Sistema de Transporte Público.

Luego, se puede observar que el 32,58% de la población experimenta un aumento en los tiempos medios de viaje al pasar de la red del Transporte Privado a la red del SETP de un 50% en promedio. Significando en los recorridos de mayor tiempo de viaje gastado, hasta 18 minutos de incremento.

En un análisis más a fondo, se revisa el incremento en los tiempos de viaje entre las dos redes anteriores pero se especifica la población por estrato socioeconómico. En la siguiente gráfica, se visualiza de una manera más esquemática los resultados obtenidos del análisis en mención:

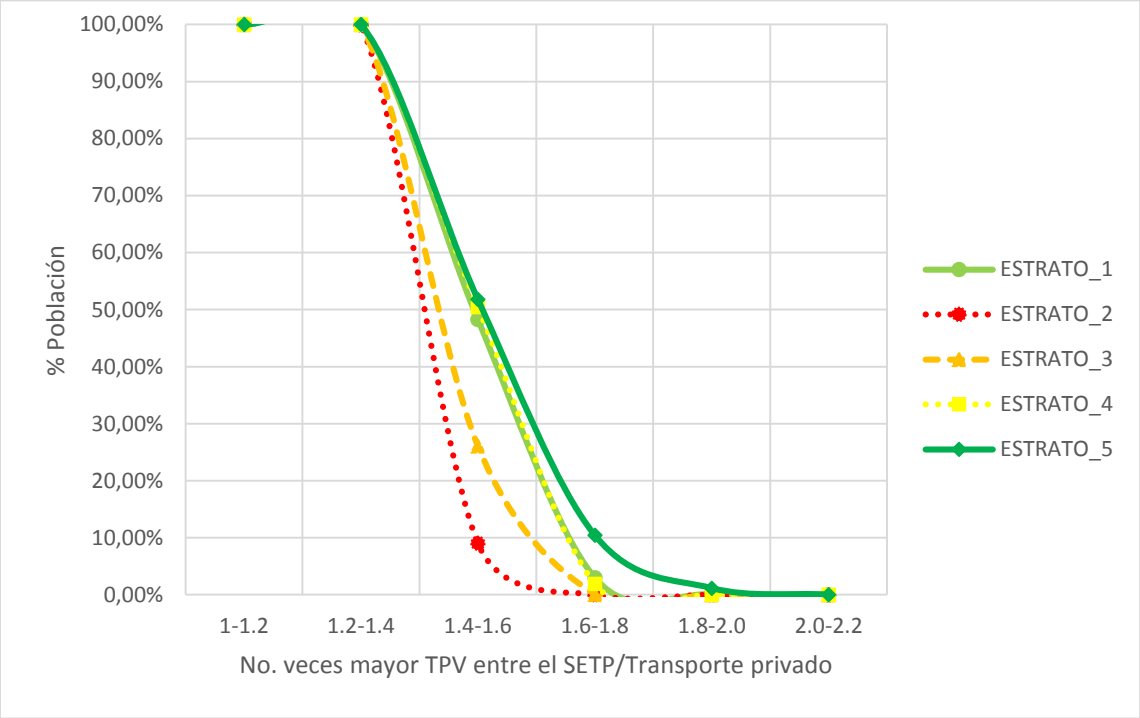

Figura 23 Comparación del TPV entre el SETP y el Transporte privado por estrato socioeconómico.

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, en la Figura 23 se evidencia que el estrato 5 y el estrato 1 presentan una tendencia de un ahorro más significativo que el resto de estratos, lo que puede referenciar una inequidad social, si se tiene presente las diferencias económicas que tiene un estrato y el otro, pues el estrato 5 tiene un mayor poder adquisitivo que el estrato 1. Lo anterior significa, que para el Transporte público, además de factores económicos, el tiempo de viaje podría influir considerablemente en la toma de decisiones para el uso del mismo, pues la cobertura de los tiempos de viaje más altos se encuentran en estos dos estratos, y para el caso del estrato 1 el uso de la motocicleta sería un modo de transporte mucho más beneficioso si se piensa en el costo final del viaje con variables como el tiempo de

viaje y el valor económico del mismo. Así también sucedería con el estrato 5, sin embargo el factor económico no sería tan influyente como la comodidad y el menor tiempo en el viaje.

5. Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con la evaluación realizada sobre la red vial de las rutas proyectadas del Sistema Estratégico de Transporte Público para la ciudad de Armenia, se obtuvieron tiempos promedios de viaje entre los 20 y 65 minutos. Si se comparan con los tiempos del transporte público para la región cafetera, especialmente con la ciudad de Manizales, en donde se registran tiempos promedio de viaje para el transporte público colectivo incluyendo el cable aéreo entre los 35 y 105 minutos (Escobar & Garcia, 2012), se puede concluir que Armenia, si bien cuenta con una menor área urbana, presenta un rango de tiempos de viaje mucho menor que el del transporte colectivo urbano de la ciudad de Manizales. Lo anterior, se puede ver reflejado en la variación anual de pasajeros transportados, pues mientras que para el área metropolitana de Manizales la variación fue del -2,3 %, para la zona urbana de la ciudad de Armenia ascendió un 3,6% (DANE, 2019)

Se observa que la curva de tiempo promedio de viaje de menor valor es la de 20 minutos, que cubre principalmente el sector centro de la ciudad, donde confluyen en un paradero especifico 22 de las 46 rutas proyectadas, atravesando las dos vías arterias principales de Armenia, que son la carrera 19 en sentido norte-sur y la carrera 18 en sentido sur-norte. La curva de 25 minutos, que también puede ser considerada como buena accesibilidad, cubre además de la zona centro, sectores en el sur-occidente de Armenia, por toda la conexión generada con la Avenida 14 de octubre por la cual atraviesan 4 rutas del SETP y la calle 21 en el sector de los Barrios San José y Las Américas por donde atraviesan 6 rutas del SETP.

En general, si se observa de forma detallada el Mapa de Isócronas de la Figura 11, se infiere que la Accesibilidad Media Global para el Sistema Estratégico de Transporte Público en la Ciudad de Armenia, es aceptable, pues las curvas que presentan un valor del tiempo de viaje promedio entre los 20 y 40 minutos, cubren el 80,06% del área urbana de la Ciudad, siendo este rango de tiempo bondadoso para una ciudad capital como Armenia.

Así también, en este mismo rango de tiempo las curvas isócronas que van desde los 20 hasta 40 minutos, cubren el 91,79% del total de la población de la Ciudad. Así mismo, cabe

anotar que el 50% de la población que se encuentra dentro de los estratos 1, 2, 3 y 4 está cubierta por la curva de tiempo promedio de viaje de 30 minutos, lo que representa una buena accesibilidad para la población más vulnerable si se tiene en cuenta que los barrios que se categorizan en estos estratos se encuentran alejados de las zonas de atracción de la ciudad, como Universidades, hospitales y clínicas, centros financieros y comerciales. Por el contrario, el estrato 5, que se considera como un estrato de nivel socioeconómico alto, presenta una baja accesibilidad, con una cobertura para la curva de tiempo medio de viaje de 30 minutos de tan solo el 10% de la población. La influencia de esta baja accesibilidad, radica principalmente en el sector de la avenida Centenario, en donde no se cuenta con las suficientes vías colectoras que comuniquen esta arteria principal, con el resto de la malla vial. Así mismo, impacta el hecho de proyectar una sola ruta del SETP que cubra esta zona, teniendo en cuenta que gran parte de la población se desplaza hacia equipamientos representativos ubicados allí, como colegios y centros de educación superior, ejemplo Sena Agropecuario y Construcción. Este último caso, si se revisa a profundidad, a pesar de encontrarse ubicado en una zona de estrato alto, la mayor parte de la población que se desplaza hasta allí está categorizada en los estratos más bajos, lo que indicaría para ellos, una accesibilidad baja al usar el transporte público. Así mismo, al tratarse de una zona altamente residencial y de estratos socioeconómicos altos, desincentiva el uso del transporte público el hecho de presentar una baja accesibilidad como la arrojada por el presente estudio.

Por otro lado, los tiempos medios de viaje de la red de transporte privado de Armenia, oscilan entre los 14 y 36 minutos. Esto indica, una reducción sustancial en los tiempos de viaje, comparado con la red vial para las rutas proyectadas del SETP. Lo anterior, se ve sustentado en el gradiente de ahorro calculado entre la red del SETP y la red del transporte privado, en donde se obtuvieron ahorros entre el 18% y 50% del tiempo de viaje promedio. Esto quiere decir que, siendo el ahorro más bajo el 18% podría reflejar un ahorro en el tiempo de viaje, desde 3,6 minutos hasta 11,7 minutos; y por el ahorro más alto se podrían evidenciar tiempos promedio de viaje desde los 10 minutos hasta los 32.5 minutos.

A su vez, se evidencia que el estrato 5 presenta el mayor ahorro en tiempo de viaje, al pasar del transporte público colectivo al privado, pues más de la mitad de la población presentaría por lo menos un 30% de ahorro. Paradójicamente, los resultados del ahorro

para el estrato 1 son similares, lo que indica un grado de inequidad social, teniendo en cuenta que dos estratos que económicamente son opuestos, presenten un ahorro significativo cambiando del SETP al transporte privado. Este indicador, refleja el aumento en el parque automotor para la ciudad de Armenia, pues para el caso del estrato 1, el uso de la motocicleta, además de significarle un ahorro en su tiempo de viaje, podría impactar sustancialmente de manera positiva en el costo final de su viaje; caso similar, sucedería con el estrato 5, en donde la población, por comodidad y ahorro en tiempo de viaje, prefiere el uso del vehículo privado.

A pesar de los resultados obtenidos, es necesario destacar los tiempos de viaje del sistema de transporte público de la ciudad de Armenia, ya que estos tiempos en comparación con ciudades semejantes, son óptimos.

Como se visualizó en el documento, en los resultados obtenidos de accesibilidad media global para el SETP se observan los tiempos más altos en sectores donde además de no presentar una infraestructura vial suficiente para conectar las diferentes avenidas principales, impacta el hecho de no contar con las suficientes rutas de transporte que permitan cubrir o conectar de una manera más rápida estas zonas de tiempos de viaje alto.

Luego, con el fin de aumentar la velocidad de operación, la cual es una variable importante al momento del cálculo de la accesibilidad, se deberá mejorar la infraestructura vial para el paso de las flotas de buses del SETP, con carriles más amplios y/o exclusivos para este transporte, así como fijar unas paradas exclusivas para el cargue y descargue de pasajeros, pues actualmente, las paradas de estos buses son muy continuas, influyendo directamente en los tiempos de viaje.

Como un camino a una nueva investigación, se podría estudiar la cobertura mediante accesibilidad geográfica de los paraderos dispuestos para el SETP, así como la influencia en la velocidad de operación con relación a los tiempos de cargue y descargue de pasajeros. Así mismo con una programación de paradas menos constante para los buses, se podría estudiar las velocidades de operación y calcular nuevamente la accesibilidad, con el fin de comparar el escenario de los resultados obtenidos en este estudio, con los resultados de esta nueva accesibilidad.

Finalmente, se recomienda que los resultados obtenidos de accesibilidad para el SETP, se deberán conectar con la planificación del nuevo Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad, el cual inicia su vigencia para el 2023. Especialmente en la proyección de los usos del suelo y las áreas de expansión, que deberán estar coordinados con la planeación de las rutas proyectada para cubrir toda la ciudad, pues además de garantizar una infraestructura vial adecuada para estas nuevas poblaciones que resultan de la expansión urbana, se debe pensar estrictamente en las medidas a tomar para cubrir estos sectores con el transporte público.

6. Bibliografía

Alcaldía de Armenia. (2009). DECRETO NÚMERO 100 DE 2009. Armenia, Quindío, Colombia.

Bocarejo, J. P., Escobar, D., Oviedo, D., & Galarza, D. (2016). Accessibility analysis of the integrated transit system of Bogotá. *International Journal of Sustainable Transportation ISSN:*.

Camacol. (2017). *Informe de calidad de vida de la Ciudad de Armenia.* Armenia.

Cardona, M., Zuluaga, J., & Escobar, D. (2017). Análisis de la red de ciclo-rutas de Manizales (Colombia) a partir de criterios de accesibilidad territorial urbana y cobertura de estratos socioeconómicos. *Espacios*.

Cardona, S., Escobar, D. A., & Moncada, C. A. (2017). Evolución del número de pasajeros movilizados en los Sistemas estratégicos de transporte público en Colombia. Análisis cuantitativo. *Espacios*, 11.

Cascetta, E., & Papola, A. (2009). Dominance among alternatives in random utility models. *Transportation Research*.

Curaduría Urbana No. 2 de Armenia. (2017). *Curaduría Urbana No. 2 de Armenia*. Obtenido de https://www.curaduria2armenia.com/seccion/datos-generales

Dalvi, M. Q., & Martin, K. M. (1976). The measurement of accessibility: some preliminary results. *Transportation*.

DANE. (2009). Proyecciones nacionales y departamentales de población 2005-2020. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.

DANE. (2019). *Boletín Técnico - Encuesta de Transporte Urbano de Pasajeros [ETUP].* Bogotá.

Departamento Administrativo de Planeación. (2016). *Ficha Básica Municipal .* Armenia.

Departamento Nacional de Planeación. (2002). Política para mejorar el servicio de transporte público urbano de pasajeros. Bogotá.

Departamento Nacional de Planeación. (2007). Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010. Bogotá, Colombia.

Departamento Nacional de Planeación. (2009). Sistema Estratégico de Transporte Público de Pasajeros para la ciudad de Armenia. Bogotá.

Dijkstra, E. W. (1959). A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik*, 269-271.

Escobar G., D. A., & Garcia O., F. J. (2012). *Análisis de priorización de proyectos viales, caso Manizales (Colombia).* Manizales: Blanecolor S.A.S.

Escobar Garcia, D. A. (2008). Indicadores de accesibilidad del transporte público, diagnosis de partida hacia una ciudad sostenible. Aplicación en la ciudad de Manizales (Colombia). Manizales.

Escobar, D. A., & García, F. J. (2011). Beneficios Evaluados a partir de un Análisis de Accesibilidad Territorial Urbana para un Sistema de Transporte Tipo Cable. *Ingeniería de Transporte*, 28-34.

Escobar, D. A., & Garcia, F. J. (2012). *Diagnostico de la Movilidad Urbana de Manizales.* Manizales.

Escobar, D. A., & Urazán, C. F. (2014). Accesibilidad territorial: instrumento de planificación urbana y regional. *Tecnura*, 241-253.

García Velazquez, E. J., & Escobar García, D. A. (2016). *Análisis comparativo de accesibilidad territorial por nuevas intervenciones viales. Caso aplicado de la ciudad de Armenia.* Manizales.

Garcia, E. J., & Escobar, D. A. (2017). Temporalidad de la Infraestructura Vial propuesta en Armenia – Colombia vs Beneficios en términos de Accesibilidad Territorial Urbana. *Espacios*.

Geurs, K. T., & Östh, J. (2016). Advances in the Measurement of Transport Impedance in Accessibility Modelling. *European Journal of Transport and Infrastructure Research [EJTIR]*, 294-299.

Geurs, K. T., & Ritsema Van Eck, J. (2001). Accessibility measures: review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transportation scenarios, and related social and economic impact. *RIVM Report*, 1-265.

Geurs, K. T., & Van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*.

Geurs, K. T., La Paix, L., & Van Weperen, S. (2016). A multi-modal network approach to model public transport accessibility impacts of bicycle-train integration policies. *Eur. Transp. Res. Rev.*

Giraldo H., R. (2002). *Introducción a la Geoestadistica.* Bogotá.

Guío , F. A. (2010). Flujos peatonales en infraestructuras continuas:. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*.

Hansen, W. G. (1959). How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners*.

Ingram, D. R. (1971). The concept of accessibility: A search for an. *Regional Studies*.

Lei, T. L., & Goulias, K. G. (2012). Opportunity-Based Dynamic Transit Accessibility in Southern California Measurement, Findings, and Comparison with Automobile Accessibility. *Transportation Research Record*, 26-37.

Linneker, B. J., & Spence, N. A. (1992). Accessibility measures compared in an analysis of the impact of the M25 London Orbital Motorway on Britain. *Environment and Planning A*, 1137-1154.

Martín Bermejo, D. (2007). Comparación de tiempos de trayectos metro-a pie-bici en la zona urbana de Barcelona. Barcelona, España.

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2017). Barrios por comunas Armenia. Bogotá, Colombia.

Montoya G., J. A. (2019). ANÁLISIS DE COBERTURA, MEDIANTE ACCESIBILIDAD GEOGRÁFICA, PARA SISTEMAS DE PARADEROS DE TRANSPORTE PÚBLICO COLECTIVO URBANO. Manizales.

Morris, J. M., Dumble, P. L., & Wigan, M. R. (1979). Accessibility indicators for transport planning. *Transpn Res.*

Municipio de Armenia. (2009). DECRETO NÚMERO 100 DE 2009, POR MEDIO DEL CUAL SE ADOPTA EL SISTEMA ESTRATEGICO DE TRANSPORTE PÚBLICO PARA LA CIUDAD DE ARMENIA Y SE DICTAN OTRAS DISPOSICIONES. Armenia, Quindío.

Presidencia de la República de Colombia. (2009). *Decreto 3422.* Bogotá.

Sociedad Geográfica de Colombia. (2017). Obtenido de https://sogeocol.edu.co/quindio.htm

Transportation Research Board. (2000). *Highway Capacity Manual.*

Universidad del Quindío. (2005). Actualización del Plan Vial y de Transporte. Armenia.